

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH ÇELİKLERİNİN YAPI VE ISLAH ÇELİKLERİ
İLE KAYNAK KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan GARİP

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet UYSAL

Şubat 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH ÇELİKLERİNİN YAPI VE ISLAH ÇELİKLERİ
İLE KAYNAK KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan GARİP

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 03 / 02 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ozan GARİP

24.12.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatım boyunca, bu çalışmanın yürütülmesi süresince ve bu çalışmanın öngörülmesinde bilgi ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mehmet UYSAL'a; çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve teknik konularda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Ozan AKÇAKESE ve Umur KAÇAMAKLI'ya; her durumda bilgi ve teknik anlamda destek veren Mithat Zaim KERİMAK'a; akademik hayatım boyunca öneri, paylaşım ve desteklerini gördüğüm değerli hocalarım ile;

Bu günlere ulaşmamda maddi ve manevi desteğini hiç eksik etmeyen Annem'e ve Babam'a, çalışmalarım boyunca bana sabır gösteren sevgili eşim Nesrin'e, en içten teşekkürlerimi bir borç bilir; tezimi, geleceğine yön vermesini temenni ederek, biricik kızım Ela'ya adıyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ZIRH ÇELİKLERİ VE ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Zırh Çeliklerinin Tarihi	5
2.2. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi	8
2.2.1. Çeliklerin kimyasal kompozisyonu	8
2.2.2. Isıl işlemler ve oluşan mikroyapılar	10
2.3. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti.....	12
2.3.1. Kaynaklanabilme yeteneğini belirleyen etmenler	13
2.3.1.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri.....	13
2.3.1.2. Malzeme kalınlığı ve ısı girdisi ile mikroyapının korunması.....	14
2.3.1.3. Armox 500T zırh çeliğinin kaynaklanabilme yeteneği...	15

BÖLÜM 3.

ISLAH ÇELİKLERİ	18
3.1. Islah Çeliklerinin Özellikleri	18
3.2. SAE (AISI) 4140 Islah Çeliği ve Özellikleri	20
3.3. Islah Çelikleri İle SAE (AISI) 4140 Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti	23
3.4. DIN C45 Çeliği ve Özellikleri	24
3.5. DIN C45 Çeliği Kaynak Kabiliyeti	26

BÖLÜM 4.

YAPI ÇELİKLERİ.....	29
4.1. Yapı Çeliklerinin Genel Özellikleri.....	29
4.2. St52 (S355) Yapı Çelikleri	29
4.3. Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği	31

BÖLÜM 5.

ZIRH ÇELİKLERİNDE KULLANILAN KAYNAKLI İMALAT

YÖNTEMLERİ.....	32
5.1. MIG/MAG Gaz Altı Kaynağı.....	33

BÖLÜM 6.

KAYNAKLARIN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENELERİ.....	35
6.1. Tahribatsız Muayene	35
6.1.1. Gözle muayene (VT)	36
6.1.2. Penetrant sıvısı (sıvı emdirme) ile muayene (PT)	38
6.1.3. Radyografik (röntgen) ışınları ile muayene (RT)	42
6.2. Tahribatlı Muayene.....	45
6.2.1. Çekme testi	46
6.2.2. Çentik darbe testi	51
6.2.3. Eğme testi	54
6.2.4. Sertlik testi	56
6.2.5. Makro/mikro yapı testi	60

BÖLÜM 7.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	62
7.1. Deneysel Parçalarının Kimyasal ve Mekanik Özellikleri	62
7.2. Kaynaklı Birleştirme.....	63
7.2.1. Kaynak parametreleri	64
7.3. Tahribatsız Muayeneler	66
7.3.1. Görsel muayene	67
7.3.2. Penetrant muayenesi	67
7.3.3. Radyografik muayene.....	68
7.4. Tahribatlı Muayeneler	70
7.4.1. Çekme testi	70
7.4.2. Çentik darbe testi	72
7.4.3. Eğme testi	73
7.4.4. Sertlik testi.....	75
7.4.5. Makro/mikro yapı testi	77

BÖLÜM 8.

DENEYSEL SONUÇLAR	79
8.1. Tahribatsız Muayene Sonuçları	79
8.2. Tahribatlı Muayene Sonuçları	79
8.2.1. Çekme testi sonuçları.....	79
8.2.2. Çentik darbe testi sonuçları	84
8.2.3. Eğme testi sonuçları.....	96
8.2.4. Sertlik testi sonuçları	98
8.2.5. Makro/mikro yapı testi sonuçları.....	102

BÖLÜM 9.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	118
9.1. Sonuçlar	118
9.2. Öneriler	120
KAYNAKLAR	122

ÖZGEÇMİŞ	127
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: % uzama
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü
Ar	: Argon
CE	: Karbon eşdeğeri
d	: Et kalınlığı
DIN	: Alman standartlar enstitüsü
e / ε	: Genleme
EDS	: Enerji dağılım spektroskopisi
EN	: Avrupa standardı
F	: Kuvvet / Yük
HBW	: Brinell sertliği
HRA	: Rockwell A sertliği
HRB	: Rockwell B sertliği
HRC	: Rockwell C sertliği
HRF	: Rockwell F sertliği
HV	: Vickers sertliği
Hz	: Herzt
I	: Akım
ISO	: Uluslararası standart
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
J	: Joule
kgf	: Kilogramkuvvet
kN	: Kilonewton
MAG	: Metal aktif gaz kaynağı
MIG	: Metal inert gaz kaynağı
MIL	: Military (Askeri standart-ABD)

MnS	: Mangan sülfür
MPa	: Megapaskal
n	: Enerji verimlilik faktörü
N	: Newton
NDT	: Tahribatsız muayene
P	: Kuvvet / Yük
Q	: Isı girdisi
QT	: Su verilmiş ve temperlenmiş ıslah elięi
Re / Rp	: Akma gerilmesi
Rm	: Çekme gerilmesi
SAE	: Amerikan otomotiv kalite normu
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TIG	: Tungsten asal gaz kaynağı
TS	: Türk standartı
TTT	: Sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramı
V	: Voltaj
δ	: Delta
ϑ	: Kaynak hızı
μ	: Mikron
σ	: Gerilme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Anatomik göğüs zırhı, M.Ö. 4. Yüzyıl sonu.....	1
Şekil 1.2. Zırhlı askeri araç	2
Şekil 2.1. Roma dönemine ait kazılar sonrası metalografik olarak incelenen zırh malzemeleri. a), b): Çelik, c), d): Demir	5
Şekil 2.2. III. Mustafa'nın zırh elbisesi.....	6
Şekil 2.3. Zırh çeliklerinin hammaddeden haddeleme sonrası mamülüne kadar üretim aşaması	8
Şekil 2.4. Karbür yapıcı elementlerin temperleme sıcaklıklarında sertliğe etkileri	11
Şekil 2.5. Plastik şekil verme sonrası zırh çeliklerine uygulanan ısıl işlem kademeleri	12
Şekil 3.1. Islah çelikleri ile imal edilen xz çeşitli makina ve araç parçaları (krank mili, cıvata ve somunlar, aks, piston).....	19
Şekil 3.2. SAE/AISI 4140 çeliğine ait ısıl işlem TTT diyagramı	22
Şekil 3.3. Su verme sonrası 350°C'de iki saat süreyle menevişlenmiş AISI 4140 çeliğine ait mikroyapı	22
Şekil 3.4. %0,5 C içeren çeliğin sıcak dövme sonrası oluşmuş kaba taneli ve homojen olmayan mikroyapısı.....	26
Şekil 3.5. Islah pasosu uygulamasının gösterimi	27
Şekil 4.1. Kaynaklanabilir bazı yapı çeliklerinin mekanik özellikleri ve normlara göre simgeleri.....	30
Şekil 5.1. MIG/MAG gaz altı kaynağı ark bölgesi	33
Şekil 5.2. MIG/MAG gazaltı kaynağı şematik gösterimi	34
Şekil 6.1. Görsel muayenede bakış açısı.....	37
Şekil 6.2. Çubuk endoskop	37
Şekil 6.3. Penetrant muayenesi uygulama aşamaları	39

Şekil 6.4. Alüminyum kaynağı dikişinde penetrant muayenesi sonrası görülen krater çatlağı.	40
Şekil 6.5. Penetrant muayene uygulama sırası akış şeması	41
Şekil 6.6. Radyografik testin çalışma prensibi	43
Şekil 6.7. Bir X ışını tüpünün şematik görüntüsü	43
Şekil 6.8. Radyografik film çıktısı	44
Şekil 6.9. Radyoskopi yönteminin şematik görünümü	44
Şekil 6.10. Çekme testi düzeneği.	47
Şekil 6.11. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri.....	48
Şekil 6.12. Elastisite modülünün tespiti.....	49
Şekil 6.13. Çekme diyagramında akma dayanımının gösterimi	49
Şekil 6.14. Çekme diyagramında çekme gerilmesi noktasının gösterimi.	49
Şekil 6.15. Gerilme-genleme eğrisi altında şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi.....	50
Şekil 6.16. Çekme testi cihazı	51
Şekil 6.17. Charpy ve Izod deneylerinde kullanılan numuneler ve darbe testi düzeneği.....	53
Şekil 6.18. 3 nokta eğme deneyi düzeneği.....	55
Şekil 6.19. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı.....	55
Şekil 6.20. Sabit ve portatif sertlik ölçüm cihazları.....	57
Şekil 6.21. Malzeme cinsine göre kullanılan Rockwell uç çeşitleri	58
Şekil 6.22. Rockwell sertlik testinin şematik gösterimi.....	58
Şekil 6.23. Brinell sertlik testinin şematik gösterimi	59
Şekil 6.24. Vickers sertlik testinde kullanılan ucun şematik gösterimi	59
Şekil 7.1. Seramik altlık ile kaynak hazırlığı yapılmış test numunesi ve kaynatılan başlıklar.....	64
Şekil 7.2. Kaynak öncesi test numune parçası.	65
Şekil 7.3. X kaynak ağzı görüntüsü.	65
Şekil 7.4. Kaynak işleminden hemen sonra yapılan sıcaklık ölçümleri.....	66
Şekil 7.5. Kaynaklı test parçaları.	66
Şekil 7.6. Test parçası kaynak kep ölçümü.	67
Şekil 7.7. Uygulama için penetrant sıvısı, temizleyici ve geliştirici.....	68

Şekil 7.8. Test parçaları penetrant muayenesi.....	68
Şekil 7.9. T1 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.	69
Şekil 7.10. T2 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.	69
Şekil 7.11. T3 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.	69
Şekil 7.12. Çekme testi numune ölçüleri.	70
Şekil 7.13. Çekme testi cihazı.	71
Şekil 7.14. Çekme testi numuneleri.	71
Şekil 7.15. Çentik darbe testi numune ölçüleri.	72
Şekil 7.16. Çentik darbe testi numuneleri.	73
Şekil 7.17. Çentik darbe testi cihazı.....	73
Şekil 7.18. Plakalardan çıkarılan eğme testi numuneleri.	74
Şekil 7.19. Eğme testi için kullanılan çekme testi cihazı ve teste hazır numune..	75
Şekil 7.20. Mikrosertlik test cihazı.	75
Şekil 7.21. Sertlik testi numuneleri.	76
Şekil 7.22. Sertlik ölçümü.	76
Şekil 7.23. Metalografi yüzey hazırlama cihazları.....	77
Şekil 7.24. Optik mikroskop.	77
Şekil 7.25. Jeol JSM- 6060LV Model SEM cihazı (Taramalı elektron mikroskobu).	78
Şekil 8.1. T1-1 ve T1-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri.	81
Şekil 8.2. T2-1 ve T2-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri.	82
Şekil 8.3. T3-1 ve T3-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri	82
Şekil 8.4. Çekme testi sonrası numunelerin görünümü.....	83
Şekil 8.5. Çekme testi sonrası T1-1 ve T1-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.	83
Şekil 8.6. Çekme testi sonrası T2-1 ve T2-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.	83
Şekil 8.7. Çekme testi sonrası T3-1 ve T3-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.	84
Şekil 8.8. Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi.....	84
Şekil 8.9. Çentik darbe testi sonuçları grafiği (-40 °C).....	86
Şekil 8.10. Çentik darbe testi değerlerinin bölgesel ortalama grafiği.....	86

Şekil 8.11. T1 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.	87
Şekil 8.12. T2 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.	88
Şekil 8.13. T3 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.	89
Şekil 8.14. T1 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.	91
Şekil 8.15. T2 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.	92
Şekil 8.16. T3 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.	93
Şekil 8.17. Kaynak dikişi bölgesindeki 1 nolu küresel kalıntının EDS nokta analizi.	94
Şekil 8.18. Kaynak dikişi bölgesindeki 2 nolu küresel kalıntının EDS nokta analizi.	94
Şekil 8.19. ITAB bölgesindeki çentik darbe numunesinde görülen küresel kalıntının EDS nokta analizi.	94
Şekil 8.20. T1, T2 ve T3 numunelerine ait zırh çeliğine kaynaklı diğer çeliklerin ITAB bölgelerindeki kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) T1 numunesi ITAB bölgeleri; c, d) T2 numunesi ITAB bölgeleri; e, f) T3 numunesine ait ITAB bölgeleri.	96
Şekil 8.21. Numunelerin açılı kırılma ve bükülme görselleri.	97
Şekil 8.22. Eğme testi numunelerinin kırık yüzey görselleri.	98
Şekil 8.23. Sertlik ölçüm bölgeleri numaralı şematik gösterimi.	98
Şekil 8.24. T1 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.	99
Şekil 8.25. T2 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.	100
Şekil 8.26. T3 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.	100
Şekil 8.27. Numunelerin sertlik dağılımları ortalamalarının bölgelere göre karşılaştırma grafiği.	102
Şekil 8.28. T1, T2 ve T3 numunelerine ait makroyapı görüntüsü.	103

Şekil 8.29. T1 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) SAE 4140 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.....	105
Şekil 8.30. T2 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) C45 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.....	107
Şekil 8.31. T3 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) S355J2 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.....	109
Şekil 8.32. T1 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) SAE 4140 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri	112
Şekil 8.33. T2 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l, m, n) C45 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.....	114
Şekil 8.34. T3 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; g, h, ı, j, k, l) S355J2 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.....	116

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Zırh çeliklerinde imalat yöntemleri doğrultusunda istenilen kriterler. .	3
Tablo 2.1. Zırh çelikleri kimyasal kompozisyonları	9
Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri	9
Tablo 2.3. Armox serisi zırh çeliklerinin yapısı bozulmaması için kaynaklı imalatında olması gereken üst sınır sıcaklık verileri.	16
Tablo 2.4. Armox serisi zırh çeliklerinin türüne göre karbon eşdeğeri değerleri ..	16
Tablo 3.1. İslah çeliklerinin kimyasal kompozisyonları	20
Tablo 3.2. İslah çeliklerinin mekanik özellikleri	21
Tablo 3.3. C45 ve Ck45 kalite çeliklerin ayrımı	25
Tablo 4.1. St52 (S355) çeliğinin kimyasal kompozisyonu.	30
Tablo 4.2. Kaynaklanabilirlik açısından TS EN 137'ye göre çeliklere katılan alaşım elementlerinin azami miktarları	31
Tablo 6.1. Sertlik testi türleri ve uygulama alanları.....	56
Tablo 7.1. Armox 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu	62
Tablo 7.2. Armox 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri	62
Tablo 7.3. Östenitik kaynak dolgu metaline ait kimyasal kompozisyon	63
Tablo 7.4. Östenitik kaynak dolgu metaline ait mekanik özellikler	63
Tablo 7.5. Test parçalarına uygulanan kaynak parametreleri.	64
Tablo 8.1. Çekme testi sonuçlarının tablo görünümü.	80
Tablo 8.2. Darbe testi sonuçları.	85
Tablo 8.3. 3 nokta eğme testi sonuçları.....	97
Tablo 8.4. T1 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.	99
Tablo 8.5. T2 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.	99
Tablo 8.6. T3 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.	100
Tablo 8.7. Sertlik değerlerinin ortalamaları ile oluşturulmuş sonuçların tablo görünümü.....	101

ÖZET

Anahtar kelimeler: C45, S355J2, SAE 4140, Tahribatlı/Tahribatsız Muayene, Zırh Çeliği

Bu çalışmada Armox 500T zırh çeliğine, östenitik esaslı kaynak dolgu malzemeleri ile endüstride yaygın olarak kullanılan S355J2 yapı çeliği ve SAE 4140, C45 ıslah çeliklerinin MIG/MAG kaynaklı imalat yöntemiyle birleştirilmesi sağlanmış, oluşabilecek kaynak hataları ve kaynaklı bölgedeki mekanik özellikler incelenerek, ıslah ve yapı çeliklerinin zırh çeliğine kaynaklanabilirliği açısından aralarında karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken, homojen durum için benzer kaynak parametreleri kullanılmış ve aynı koruyucu gaz ortamları sağlanmıştır. Numuneler, mekanik testlerde doğru veriler sağlaması amacıyla; görsel muayene, penetrant muayenesi, radyografik muayene gibi tahribatsız muayene yöntemleriyle olası kaynak hatalarına karşı test edilmiştir. Aynı numunelere mikroyapıların uygunluğuna göre tahribatlı muayene yöntemlerinden; çekme testi, darbe testi, eğme testi, sertlik testi ve makro/mikro yapı testleri ile birlikte; kırık darbe testi ve makro/mikro numunelerine SEM incelemesi de yapılmıştır. Tahribatsız muayenelerde herhangi bir süreksizlik tespit edilmediği gibi; tahribatlı ve SEM muayenelerinde de mikroyapıların uygunluğuna göre elde edilen veriler deneysel olarak incelenmiş, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF WELDING CAPABILITY OF ARMOR STEELS WITH STRUCTURAL AND QUENCHED AND TEMPERED STEELS

SUMMARY

Keywords: C45, S355J2, SAE 4140, Destructive/Non-Destructive Testing, Armor Steel

In this study, austenitic based welding filler materials and S355J2 structural steel and SAE 4140, C45 QT (quenched and tempered) steels, which are widely used in the industry, were joined to Armox 500T armor steel by MIG/MAG welded manufacturing method. Welding defects and mechanical properties in the welded area were examined and comparisons were made in terms of weldability of QT (quenched and tempered) and structural steels to armor steel. While making comparisons, similar welding parameters were used for homogeneous condition throughout the process and the same shielding gas environments were provided. Samples, in order to provide accurate data in mechanical tests; It has been tested against possible welding defects by non-destructive testing methods such as visual inspection, penetrant inspection, and radiographic inspection. From destructive testing methods to the same samples according to the suitability of microstructures; In addition to tensile test, impact test, bending test, hardness test and macro/micro structure tests, SEM examination was also performed on fractured impact test and macro/micro samples. As good as not any discontinuity was detected in nondestructive examinations; The data obtained according to the suitability of the microstructures in the destructive and SEM examinations were also examined experimentally, and it was seen that the results were compatible with each other.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Tarihteki ilk zırh malzemeler bazı hayvan derileri ve farklı metallere üretilmiş kalkanlardan oluşmuş, bulunduğumuz yüzyılda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin birçoğu çeşitli teknolojik savunma ve silah sistemlerini tamamlamış olmakla birlikte, savaş ve barış durumlarında gerektiğinde kullanılmak üzere zırhlı sistemlerin teknolojik gelişiminde birçok ilerlemeler kaydetmişlerdir. Gelişmiş ülkelerde zırhlı malzeme ve teknolojik gelişmelerin üretimi ve kullanımı ekonomik ve siyasi yönden zayıf ülkelere göre daha fazladır.



Şekil 1.1. Anatomik göğüs zırhı, M.Ö. 4. Yüzyıl sonu [6].

Zırh çelikleri ateşli silahlar, personel koruyucular, personel taşıyıcı zırhlı araçlar, mühimmat taşıyıcı ve ateşli silahlara sahip tank ve taktik vb. zırhlı araçlarda kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanı askeri araçların imalatı ve tehdit oluşturan

dış etkenlere karşı koruma kalkanı olarak kullanılmaktadır. Savunma sanayisinin teknolojik ilerlemesine paralel olarak silahlarda kullanılan çeşitli mühimmatların insana zarar vermemesi için buna karşı koyabilecek darbe dayanımlarına sahip zırh ürünlerinin geliştirilmesine, teknolojinin gelişimine paralel olarak devam edilmektedir [1, 2].

Gelişmekte olan ülkelerde savunma sanayisine yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları ve bu çalışmalara mali destek sağlayan askeri projeler her gün artmaya devam etmektedir. Teknolojik ilerlemeler modern ateşli silahların geliştirilmesini hızlandırmakta ve buna paralel olarak savunma sanayi sektörü materyallerinin üretimini de ivmelendirmektedir [2].

Ateşli ağır silahlarda kullanılan mühimmatın, penetratörün ya da ateşli şarapnel parçacıklarının, türüne, geometrisine ve nüfuziyet kinetiğine göre koruyucu malzeme seçimi yapılır. Bu malzemeler içerisinde zırh çelikleri, savunma sektöründe çeşitli olarak personel ve mühimmat taşıyan taktik araçlarda koruyucu ve darbe önleyici malzeme olarak kullanılabilir [2, 5].



Şekil 1.2. Zırhlı askeri araç [7].

Darbe ve basınç dayanımı yüksek zırh çelikleri askeri araç imalatlarında sürekli olarak kullanılmaktadır. Zırhlı taktik askeri araçlar (Şekil 1.2.) dış tehditlere karşı geliştirilmiş yüksek koruma sağlamalıdır. Ayrıca bu araçlar darbe etkisi düşük mühimmatlara karşı yüksek mekanik dayanım göstermelidirler. Çünkü en çok bilinen alaşım içeriği düşük çelikler ve dökme demirler bu tehditleri önlemede, zırh çelikleri kadar koruma seviyesi sağlayamamaktadır, bu nedenle de zırhlı araç imalatlarında kullanılmamaktadırlar. Balistik olarak kullanılan zırh çeliği türleri, darbe etkili mühimmatların etkisine maruz kaldığında rijitlik korunmalı ve balistik olarak mekanik beklentilerinin de yüksek seviyede olması istenir. Zırh çeliklerinin üretimini yapan gelişmiş ülkeler, bu çeliklerin üretimini genel olarak MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarına uygun olarak imal ederler ve bu standartlarda geçen 7,62mm, 12,7mm, 14,5mm, ve 20mm ebatlarındaki askeri mühimmatlara karşı koruyucu etki gösterirler. Savunma sanayisine yönelik geliştirilmiş olan zırhlı taktik muharebe ile personel ve mühimmat taşıyıcı araçlarda kullanılan zırh materyallerinden istenen özelliklerden biri de hafif olmalarıdır. Hafiflik zırhlı araçların arazi koşullarındaki çok yönlü manevra ve taktik yetenekleri açısından, savaş zamanlarında araçların ön plana çıkmasında etkili olmaktadır [2, 5].

Tablo 1.1. Zırh çeliklerinde imalat yöntemleri doğrultusunda istenilen kriterler [4].

	İmalat Yöntemleri			
	Isıl Etkiler	Kaynak	Şekillendirme	Talaşlı İmalat
Metalurjik Özellikler	-Düşük Karbon Eşdeğeri	-Düşük Karbon Eşdeğeri	-Yüksek Süneklik	-Yüksek Olmayan Sertlik
	-Sınırlı Segregasyon	-Düşük Hidrojen Miktarı		
	-Çok Düşük Hidrojen Miktarı	-Düşük Kalıntı Gerilmeleri		
	- Kalıntı Gerilme Düşüklüğü			

Tablo 1.1.'de genelde kullanılan zırh çeliklerinin, karbon eşdeğeri ve malzeme içerisindeki süreksizliklerin etkisiyle, mekanik özellikleri ile balistik olarak etkileri verilmiştir [4].

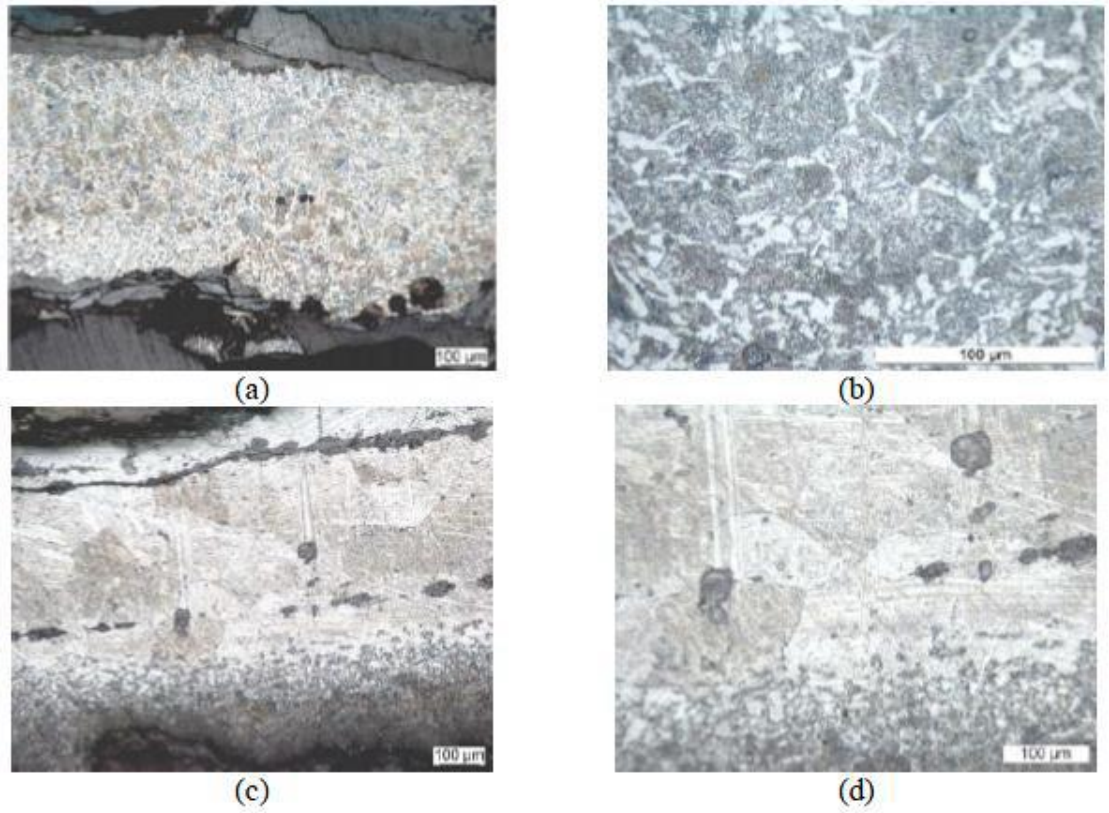
MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarında belirtilen zırh çelikleri, Sınıf-I ve Sınıf-II tipi çeliklerdir. Bu çeliklerin metalurjik olarak karakteristikleri ısılah ısı işlemi ile elde edilen su verilmiş ve menevişlenmiş düşük alaşımlı martenzitik mikroyapıdaki

eliklerdir. Sınıf-I tipi çelikler standart olarak zırlı araç imalatlarında en çok kullanılan ve mermi darbelerine karşı kullanılan çeliklerdir. Sınıf-II tipi çelikler ise, mühimmat darbelerinden ziyade patlama ile oluşan basıncın önemli olduğu yapılar için tercih edilirler ve bu sebeple yüksek sıcaklıklarda temperlenerek, temperlenmiş martenzit ve beynit mikroyapısını oluşturacak sıcaklıklarda temperlenirler [2].

BÖLÜM 2. ZIRH ÇELİKLERİ VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Zırh Çeliklerinin Tarihi

Tarihsel olarak zırh malzemeleri incelenecek olursa ilk kullanımları milattan önce 1500 yıllarında eski Mısır insanlarına ait olup, bronz gibi alaşımlardan oluşan gömlek tipi giysi ve elbiselerden surettir. Yine milattan önce 900-600 yılları arasında Asurlular küçük ve farklı geometrilere sahip bronz alaşımı materyallerden oluşan zırhlı elbiseler kullanmışlardır. Asurlular aynı tarihlerde kişisel koruyucu ekipmanlar anlamında çeşitli bronz malzemeden yapılmış materyaller kullanan ilk toplumdur [4, 8].



Şekil 2.1. Roma dönemine ait kazılar sonrası metalografik olarak incelenen zırh malzemeleri. a), b): Çelik, c), d): Demir [9].

Türk devletlerinde zırh Osmanlı kaynaklarında cebe ve cevşen adıyla geçer ve genelde bu iki kelime birlikte kullanılır. Cebe zırh anlamına gelmekle beraber Cebeci Ocağı ordunun silah ihtiyacını karşılayan askeri sınıfın adıdır. Cebeci ise zırh/silâh imal ve temin eden kimsedir. Bu dönemde savaşçılar hem kendilerini korumak amacıyla hemde binek atları için çeşitli zırhlar ve malzemeler geliştirmiştir [2, 11, 12].

Altaylar bölgesinde Hun dönemine ait Berel buluntuları ile Oms ve İrtiş havzasında yapılan kazılarda, demir zincir örme zırh parçaları ve zırh plakaları buluntularına çok önem verilmiştir. Çin kaynakları ise Yenisey Kırgızları'nın ahşaptan yapılmış zırhlı elbiselere sahip olduğunu ve atlarını da bu tip zırhlarla koruduklarını kaydetmiştir [12].



Şekil 2.2. III. Mustafa'nın zırh elbisesi (TSM, Envanter nr. 2/236) [11].

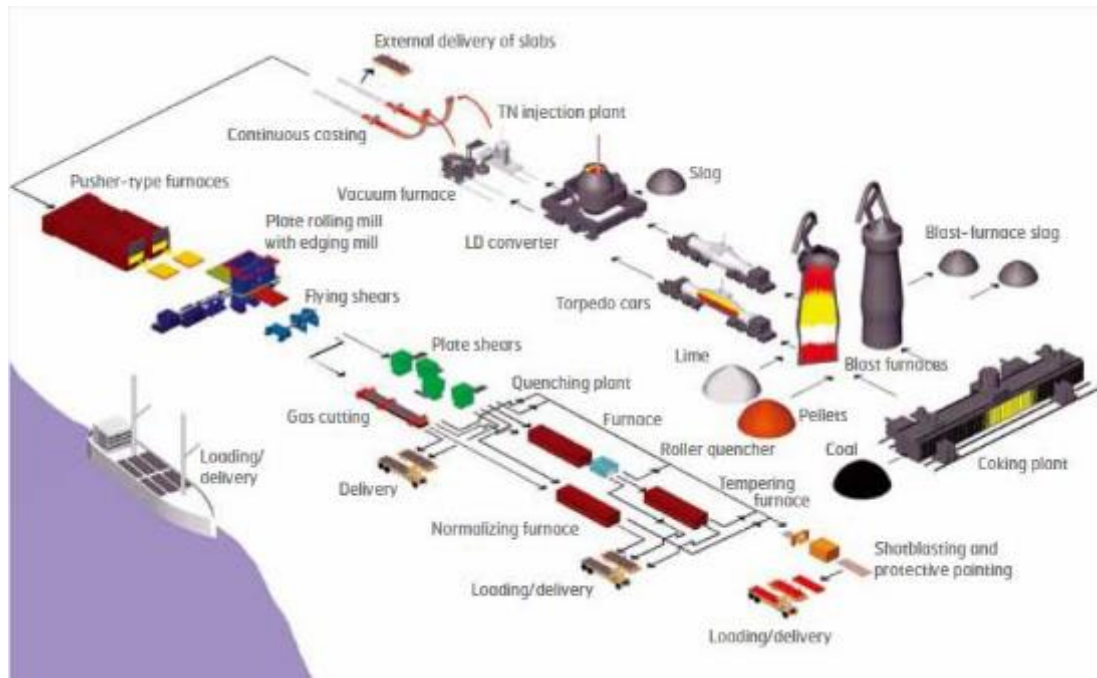
Hazar Türkleri'ne ait Stanitza köyündeki Saltova kazısındaki buluntular arasında atlara ait baş zırhları, balta buluntuları arasındaki zincir örme zırhlar ve at başlıkları bu dönemde kullanılan zırh malzemelerine örnektirler. Bizans askerleri arasında da Batı Avrupa zırhlarında farklı şekilde kendi topraklarında yaşayan bozkır Türk topluluklarının etkisiyle zincir örme zırh gömlekler kullanılmıştır. Ayrıca Orhon, Altay ve Tanrı dağları bölgesindeki Göktürk kaya resimlerindeki figürler; deriden veya demirden levhalarla örülmüş zırhlar ve sivri konik şekilde zırh başlıklı uçlarla resmedilmiştir [12].

Zırhlı araçların üretiminde tercih edilen zırh çeliklerinin, balistik açıdan yüksek dayanımlı, yüksek yorulma dirençli ve mekanik özelliklerinin iyi olması, aynı zamanda kesme, bükme, kaynak, işleme gibi üretim işlemlerinde de uygun olması istenir [13].

Balistik etkilere karşı dayanım yüksek toklukla sağlanabilmektedir. Dolayısıyla zırh çelikleri yüksek darbe tokluğuna sahip olmalıdır. İmalat uygulamalarında kullanılan parametreleri minimumda tutmak için balistik açıdan kullanılan malzemelere en uygun metalurjik karakteristikler sağlanmalıdır. Nihai olarak yapılan sertleştirme ve temperleme ısı işlemiyle birlikte, mekanik darbe dirençleriyle ile tokluk dengelenir. Bu dengelemedeki kritik özellik, Ostwald olgunlaşması ile oluşan karbür yapıcı elementlerin östenitleştirmede doyumu ile temper operasyonunda sıcaklık ve zaman etkisinde gerçekleşen karbür çökmesidir [14, 15, 16].

Genel incelemelerde zırh çeliklerinde kinetik enerjili cisimlerin çarpma etkilerine karşı etkili bir koruma gösterebilmeleri için yüksek sertliğe ve en iyi mekanik dayanımlara sahip olması istenir ve beklenir. Diğer yandan oluşan deformasyonun olumsuz etkisini yok etmek için, tokluk beklentisinin yükselmiş olması lazımdır. Bu sebeple zırh çeliklerinde, yüksek sertlik ve iyi mekanik özellikler beklentisinin yanında tokluğun da bulunması istenir. Bu özellikler bu çeliklere uygun kimyasal kompozisyon uyumu ve beklenen mekanik özelliklere göre en uygun ısı işlem koordinasyonu ile sağlanabilir [10].

Zırh çelikleri standartlarda belirtilen kimyasal kompozisyonlara uygun olarak döküm yöntemiyle ingotlar halinde dökülerek, devamında tavlama sonrası sıcak haddelenme yapılarak istenilen kalınlıkta plakalar halinde üretimi gerçekleştirilir. Haddelenerek şekillendirilen zırh çeliklerine ıslah ısıl işlemleri dediğimiz östenitleştirme, su verme ve temperleme prosesleri uygulanarak istenen mekanik dayanım, sertlik ve tokluk değerlerini alması sağlanır. Zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinde beklenen değerlerin oluşumunda en etken rol, çelik üretiminde hammadde aşamasında yapılan çelik temizliğidir [2, 17].



Şekil 2.3. Zırh çeliklerinin hammaddeden haddelenme sonrası mamülüne kadar üretim aşaması [2].

2.2. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi

2.2.1. Çeliklerin kimyasal kompozisyonu

MIL-A-12560 çeliği birçok uygulamada bugün en çok kullanılan standart zırh çeliğidir. Yüksek sert yapıya sahip MIL-A-46100 çeliği ise balistik koruma seviyesinde MIL-A-12560'a göre %20 daha etken olan bir zırh çeliğidir. Tablo 2.1.'de en çok kullanılan zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonları verilmiş, bu tür çeliklerde alaşım elementleri olarak; Vanadyum, Titanyum, Niyobyum, Alüminyum

ve Bor gibi yüksek sertlik, aşınma direnci ve darbe tokluğu sağlayan elementler de bulunabilir. Bu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler ise Tablo 2.2.'de verilmiştir. Tablo 2.1.'de verilen zırh çelikleri düşük karbon içeriğine sahiptirler. Tokluk ve kaynaklanabilme yetenekleri açısından piyasada tercih edilme sebepleridir [2, 4].

Tablo 2.1. Zırh çelikleri kimyasal kompozisyonları [4, 10].

Kimyasal Bileşim (Maksimum)	MIL-A-12560 (%)	MIL-A-46100 (%)	Armox 500T (%)
Karbon	0,30	0,32	0,32
Mangan	0,30	1,20	1,20
Kükürt	0,03	0,02	0,02
Fosfor	0,02	0,01	0,01
Silisyum	0,40	0,60	0,40
Nikel	0,50	1,85	1,80
Krom	0,40	1,25	1,00
Molibden	0,15	0,20	0,70

Zırh çeliklerindeki düşük karbon oranı darbe tokluğu açısından son derece kritiktir. Çelik içerisindeki karbon ile birlikte diğer alaşım elementleri, kaynaklanabilme yeteneklerini önemli ölçüde etkiler. Karbon miktarı yükseldikçe kaynak dikişinde çatlak olma riski de artar. Bu çatlaklar, kaynaklı yapıda istenmediğinden kaynak sonrası bazı operasyonlarla bu çatlakların giderilmesi sağlanır. Bu işlemlerin maliyet açısından tercih edilmemesi nedeniyle karbon değeri düşük tutularak en uygun koşullu kaynaklanabilme sağlanır [4].

Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [4, 10].

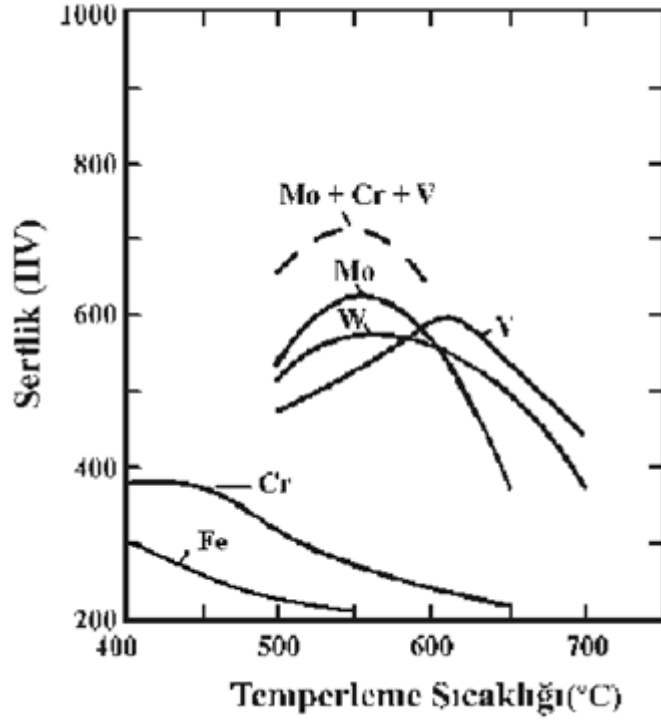
Mekanik Özellikler	MIL-A-12560	MIL-A-46100	Armox 500 T
Sertlik (HBW)	277 - 388	477 - 600	480 - 540
Akma Gerilmesi (MPa)	1150 (Min.)	1100	1250 (Min.)
Çekme Gerilmesi (MPa)	1250 (Min.)	1450 (Min.)	1450-1750
Uzama (%)	10 (Min.)	9 (Min.)	8 (Min.)
Darbe Tokluğu (-40 °C'de [J])	20-30	30-40	32 (Min.)

Ticari açıdan zırh çeliği örnekleri ile deneysel açıdan zırh çelikleri incelendiğinde özellikle alaşım elementleri açısından karbon ve borun çeliğin sertleşme etkisine direkt katkı sağladığı, mangan ve silisyumun katı eriyik sertleştirici ve kaynaklanabilme etkisine olumlu katkı sağladığı, düşük oranda kükürt ve fosfor içeriğinin MnS gibi inklüzyon kalıntıları oluşturma etkisini azaltacağından daha yüksek mekanik özellikler

sağlayacağı, molibden ve krom gibi elementlerin özellikle ısıtım işlem sonrası soğuma etkisiyle martenzitik/beynitik dönüşümü ile sertleşme özelliğini artırdığı, nikel ve kobalt gibi elementlerin tokluğa katkı sağladığı, niyobyum, titanyum, vanadyum gibi mikro alaşım elementlerinin mekanik dayanımı artıran karbür oluşumuna neden olduğu ve sertlik artırıcı olarak katkı sağladığı literatür araştırmaları ve deneysel çalışmalar ile metalografik incelemeler sonrası oluşan mikroyapısal argümanlarla desteklenmiştir [2, 3, 4].

2.2.2. Isıtım işlemler ve oluşan mikroyapılar

Zırh çelikleri martenzitik sert karakteristikte oldukları için balistik olarak optimum mekanik özelliklerini su verme sonrası temperleme işlemi ile elde ederler. Literatürde sade karbonlu çeliklerin menevişlenmesinde, su verme sonrası martenzit içinde bulunan karbon, demir ile birleşerek sementit fazının çökmesine yol açar ve bu nedenle martenzitin ferrit fazına dönüşmesiyle sertlik düşüşü gerçekleşir. Ancak çelik içerisinde bulunan karbür yapıcı alaşım elementleri, karbon ile değişik temperleme sıcaklıklarında bile karbür çökmesine sebep olurlar. Bu nedenle malzemelerde ikincil sertlik artışı gözlenir. Çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla oluşan bu sertlik artışı karmaşık bir yapıdadır. Şekil 2.4.'te temper sıcaklıklarına göre beliren karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu sertlik bağıntısı grafiği gösterilmiştir. Görüleceği üzere molibden, krom ve vanadyum içeriği olan çeliklerde yüksek temper sıcaklıklarında bile oluşan kararlı karbürler, matrislerin ilk baştaki sertliğini daha da yükseltebilmektedir. Zırh çeliklerinde krom ve molibden elementlerinin öncelikli olarak tercih edildiği grafikten yorumlanabilir [2, 4].

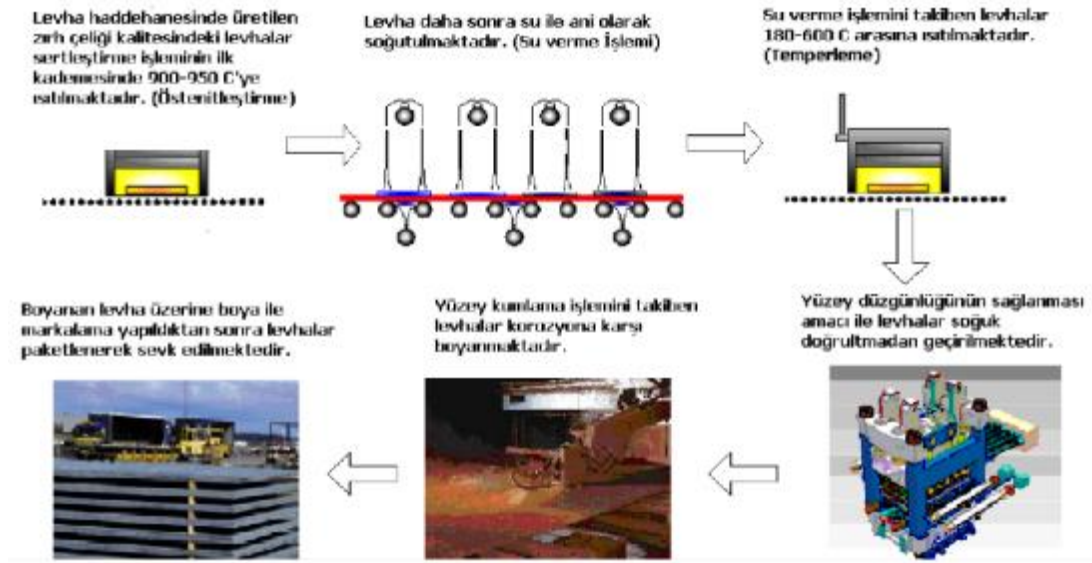


Şekil 2.4. Karbür yapıcı elementlerin temperleme sıcaklıklarında sertliğe etkileri [4].

Zırh çeliklerinde 900-950 °C sıcaklıklarda östenitleştirme işleminde matriksin gerekli karbon ve karbür oluşturuçu alaşım elementleriyle doyumu sağlanarak sonrasında su verme işlemi yapılır. Su verme sonrası elde edilen latta tipi martenzitik yapı normal şartlarda ortalama 600 °C'de menevişlenir [4]. İkincil sertlik ise direkt olarak sertleştirme sürecinde östenit fazının karbon miktarı ve alaşım elementleriyle birlikte doyum miktarına bağlıdır [2, 4].

Zırh çeliklerinin darbe direncine bağlı olarak balistik davranışlarını belirleyen temperleme işlemlerinin açıklanabilmesi için öncelikle yapı içerisinde çökelen ve çok ince olarak yapıda bulunan ikincil sertlik çökeltilerinin yapı içerisinde dağılımları ile boyutu, şekli ve miktarının belirlenmesi gerekir ve önemi büyüktür [4, 18, 19].

Sıcak haddeleme sonrası elde edilen levhalara sonrasında uygulanan ısıl işlemler sıralaması, Şekil 2.5.'te verilmiştir. Zırh olarak kullanılan çeliklerde balistik uygulamalarda bu çeliklerin kullanılmasını sağlayan mukavemet-tokluk ilişkisi, haddeleme sonrası uygulanan ısıl işlemlerle sağlanmaktadır [10].



Şekil 2.5. Plastik şekil verme sonrası zırh çeliklerine uygulanan ısıtım işlem kademeleri [10].

2.3. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

Zırh çeliklerine, kullanıldıkları yerlerde istenilen mekanik özellikleri sağlamak amacıyla, birtakım ısıtım işlemleri uygulanmaktadır. Genel olarak zırh çeliklerine, yapısal görevi itibarıyla iki farklı ısıtım işlemi uygulanmaktadır: Bunlar homojen ve homojen olmayan zırh çelikleri olarak adlandırılmaktadır. Homojen zırh çeliklerine, kinetik enerjisi bulunmayan mühimmatların darbe etkisini engellemek suretiyle tamamen ısıtım işlemi uygulanır. Homojen olmayan zırh çeliklerine ise, kinetik enerjiye sahip mühimmatların delip geçme özelliğini engellemek için, yüzey sertleştirme işlemi uygulanır. Bu tarz zırh çeliklerinde yüzey sertleştirme işlemi yapıldığından kaynaklı imalat için daha fazla titizlik gerekebilir. Bunun için kaynak bölgesi sertliğinin, zırh çeliğinden istenilen sertliklere yakın olması beklenmektedir. Ayrıca malzemedeki beklenen yüksek mukavemet değerlerini sağlayan mekanik özelliklerin korunması ve kaynak sonrası oluşabilecek fiziki kaynak hatalarının da önlenmesi gerekmektedir [2, 4].

2.3.1. Kaynaklanabilme yeteneğini belirleyen etmenler

2.3.1.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri

Zırh çelikleri, karakteristik yapısı gereği, optimum mukavemet, sertlik ve tokluk ilişkisi itibariyle, düşük alaşım içerikli yüksek mukavemet özelliğine sahip çelik sınıfına tabiidir. Bu mekanik özellikler içeriğindeki düşük alaşım ve ısıl işlem ile sağlansa da malzemenin karbon içeriği sertlik açısından önemlidir. MIL-A-46100 standardına göre üretimi yapılan zırh çeliklerinin içeriğindeki yüzde karbon miktarının kaynaklanabilme özelliklerine etkisini ölçmek için kullanılan karbon eşdeğeri formülü bu standartta belirtilen Denklem 2.3.1'deki gibidir [4]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2.1)$$

Zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonundan kaynaklanan yüksek karbon eşdeğerinden dolayı, kaynaklı birleştirmelerde yüksek sertlik ve kaynak metalinde görülen çatlama eğiliminin kritik ölçüde olduğu görülmektedir. Bu nedenle, zırh çeliklerinin kalınlığı yüksek olan uygulamalarının kaynağında ön tav, gerilim giderme gibi ısıl işlemler uygulanarak bu hatalar önlenir. Kaynağın ısıl işlemi, kaynak öncesi ön ısıtma, kaynak sırasında pasolar arası sıcaklık ve kaynak sonrasında kontrollü soğumayı gerçekleştirmektir [2, 4].

Kaynaklı imalat ısıl bir proses olduğundan, kaynak dikişi çevresinde ısı radyanının soğuma hızına etki etmesinden ötürü, iç gerilmelerin oluşmasına ve malzeme çarpılmalarına neden olur. Ön ısıtma işlemi dikiş çevresinde ısı dağılımını yumuşatmak ve soğuma hızını yavaşlatmak amacıyla uygulanır ve bu sebeple kaynak dikişinde yüksek sertlik ile birlikte iç gerilmeler ve çarpılmalar büyük ölçüde önlenmiş olur. Martenzitik yapının sert ve kırılğan bir yapı olması sebebiyle, kaynak dikiş sıcaklığının TTT diyagramındaki martenzit sınırına inmesi ertelenerek; ferrit, perlit ve beynit dönüşümlerine zaman kazandırılır. Kaba martenzit oluşumu da minimize edilmiş olur [4].

Kaynak operasyonunda, pasolar arası sıcaklık kontrollü yapılırsa kaynak dikişinde bulunan hidrojenlerin atılmasına olanak sağlar. Böylece zırh çeliklerinde önemli sorun teşkil eden hidrojen gevrekliği riski de minimize edilmiş olur [2].

Kaynaktaki yüksek ısı girdisi, kaynak dikişi çevresinde bulunan ısı tesiri altındaki bölgelerde (ITAB) mekanik özelliklerin değişmelerine sebep olacaktır. Bu nedenle zırh çeliklerinin balistik özelliklerinin bozulmaması için belirlenen maksimum ön tav ve pasolar arası sıcaklığın aşılması gerekir. Kaynak işleminden sonra, kaynak bölgesinin kontrollü soğuması beklenir. Daha çok kalın cidarlı malzemelerin kaynak bölgelerinde gerçekleşen ani soğuma etkisiyle ITAB bölgelerinde iğnemsiz martenzit gibi gevrek karakteristikli yapılar oluşur, bu nedenle de yüksek sertlik ve hidrojen gevrekliği ile birlikte çatlak meydana gelme olasılığı yüksektir [2, 4].

Yavaş soğuma ile yapı içerisindeki östenit fazının beyrit fazına dönüşmesi sağlanır. Düşük sıcaklıkta yapıda halen bulunan östenit faz miktarı azaltılmış olacağından, soğumada martenzit oluşumu da azaltılmış olacaktır. Bu şekilde zırh çeliklerinin balistik özellikleri de bozulmadan istenilen kalitede ve özellikte kaynaklı imalat işlemi gerçekleştirilmiş olur [4].

2.3.1.2. Malzeme kalınlığı ve ısı girdisi ile mikroyapının korunması

Zırh çelikleri kullanım özellikleri gereği nominal kesit kalınlıklarından daha kalın olarak üretilmektedir. Bu nedenle kaynak kabiliyeti açısından kalınlık etkisi de ön plana çıkmaktadır. Kesit kalınlığı fazla olan çeliklerde ısı iletimi nedeniyle oluşabilecek sıcaklık kaybının önlenmesi için ön tav uygulaması yapılmalıdır. Kesit kalınlığının ön ısıtmaya etkileri Daniel Seferian formülüne göre belirlenir [4]:

$$T_{\text{öntav}} = 350\sqrt{CE(1 + 0.005d) - 0,25} \quad (2.2)$$

(d: Et kalınlığı)

Ön ısıtma sıcaklığı, zırh çeliklerinde istenen en yüksek sıcaklığı geçmeyecek şekilde belirlenmelidir. Maksimum sıcaklık değerleri bilgisi üretici firma kataloglarından veya MIL-HDBK-1941 gibi ilgili dokümanlardan elde edilebilir [4].

Zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında diğer bir önemli husus ta ısı girdisidir. Zırh çeliklerinden beklenen yüksek mukavemet, tokluk ve balistik özelliklerin sağlanması için oluşturulan malzeme içerisindeki yapının kaynak işleminden sonra da korunması beklenir. Kaynak operasyonu sırasındaki ısı dağılımı kontrol altında tutularak oluşan mikroyapıların korunması sağlanabilir [2, 4].

Denklem 2.3.3 'te görüleceği üzere ısı girdisininin, akım ve voltaj değerleri ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Kaynak hızıyla ise ters orantılıdır. Bu nedenle yapılan işlemlerin proses verimi göz önünde bulundurularak uygun bir kaynak yöntemi seçilir ve ısı girdisi azaltılabilir [4]:

$$Q = n \left(\frac{V \times I}{\vartheta} \right) \quad (2.3)$$

Q: Isı girdisi (kJ/mm veya J/mm).

n: Enerji verimlilik faktörü.

I: Kaynak akımı (Amper).

V: Kaynak voltajı (Volt).

ϑ : Kaynak hızı (mm/dakika veya mm/saniye).

2.3.1.3. Armox 500T zırh çeliğinin kaynaklanabilme yeteneği

İsveç menşeli SSAB firması tarafından balistik özellikleri karşılayacak şekilde üretimi gerçekleştirilen Armox 500T zırh çeliği; mekanik özellikleri, tokluğu ve sertliği nedeniyle savunma sanayi sektöründe en çok rağbet gören çeliklerden birisidir [29]. Tercih edilmesinin en büyük sebeplerinden birisi, düşük karbon içeriğine sahip olması nedeniyle üstün kaynaklanabilme özelliğinin olmasıdır [2, 4].

Tablo 2.3. Armox serisi zırh çeliklerinin yapısı bozulmaması için kaynaklı imalatında olması gereken üst sınır sıcaklık verileri [30].

Zırh Çeliği	Armox 370T CL1 & CL2	Armox 440 T	Armox 500T	Armox 600T	Armox Advance
Sıcaklık (°C) (Maks.)	400	200	200	180	150

Kaynak ağız hazırlıklarında, çatlak oluşumunu engellemek için kaynak gerilimlerini en aza indirmek gereklidir. Bunun için kaynak ağızındaki her türlü süreksizlikler düzletilmeli ve yüzeydeki pas, yağ, boya gibi kirliliklerden ve nemden arındırılmalıdır [4, 31].

Plakalar için belirlenen ön ısıtma sıcaklığı; punta kaynağı ve kök paso operasyonu da dahil olmak üzere tüm kaynak işlemi boyunca tüm pasalarda korunmalıdır. Kaynak operasyonu süresince, zırh çelikleri yapısının korunması için geçilmemesi gereken en yüksek sıcaklık değerleri aşağıdaki Tablo 2.3.'te verilmiştir [30].

Armox zırh çeliklerinin özelliklerinde kayıp olmaması için geliştirilen en düşük karbon eş değerleri Tablo 2.4.'te gösterilmiştir [4, 31].

Kaynak dolgu metali türü seçilirken kaynak dayanımı ve tokluk değerleri göz önünde bulundurulur. Kaynaklı imalatla 500 MPa'a kadar akma mukavemetine sahip sertliği düşük olan dolgu metalleri önerilmektedir. Mukavemet ve tokluk ilişkisinin optimum düzeyde sağlanabilmesi için istenen kriterlerde minimum dayanıma sahip dolgu metali seçilmelidir. Minimum dayanımlardaki kaynak dolgu metalinin kullanılmasının yararları şu şekildedir;

Tablo 2.4. Armox serisi zırh çeliklerinin türüne göre karbon eşdeğeri değerleri [4, 31].

Zırh Çeliği Çeşidi	Kesit Kalınlığı (mm)	Karbon Eşdeğeri
Armox 370T CL1 & CL2	3-80	0,67-0,75
Armox 400T	4-30	0,68-0,72
Armox 500T	3-80	0,67-0,75
Armox 600T	4-20	0,85
Armox Advance	5-7	0,95

Kaynak metalindeki maksimum tokluğun, maksimum hidrojen çatlak direncinin ve kaynak dikişindeki en düşük miktarda kalıntı gerilmenin sağlanmış olması istenir.

Kaynak metali ve dolgusu seçiminde hidrojen miktarı düşük seçilmelidir. Ancak düşük mukavemet bazı uygulamalarda avantajını yitirip, kaynak yapısını zayıf düşürmektedir. Tasarım aşamasında bu tür bölgelerde tokluktan ödün verilerek mekanik direnci daha fazla dolgu metalleri tercih edilir [30].

BÖLÜM 3. ISLAH ÇELİKLERİ

3.1. Islah Çeliklerinin Özellikleri

Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirmeye elverişli olan ve su verme ve temperleme sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız ve alaşımlı makine imalat çelikleridir. Islah işlemi, sertleştirme ve sonrasında yapılan menevişleme işlemlerinin tamamına verilen isimdir. Sertleştirme işlemiyle maksimum seviyelere ulaşan çekme mukavemeti, menevişleme işlemiyle nispeten düşürülerek malzemeye darbe tokluğu kazandırılmaktadır. QT (Quenched and Tempered) çeliklerinde sertleşebilirlik özelliklerinin yanında, yüksek dayanım ve süneklik de istenir. Yeterli seviyede sertlik elde edilebilmesi için, ıslah çelikleri diğer çeliklere göre daha yüksek karbon içerirler. Kalın kesitli parçalar için sertlik derinliğinin en önemli faktör olması nedeniyle, bu parçalar alaşımlı ıslah çeliklerinden imal edilirler [21, 22].

Sertlik dağılımının, malzeme içeriğindeki alaşımlara göre değişimleri jominy testi ile gözlenebilir. Jominy testi basit bir ifadeyle, sertleştirme sıcaklığına kadar ısıtılan çubuk şeklinde bir malzemenin sadece bir ucundan soğutulmasıyla, soğutulan uca olan mesafelerdeki sertleşme değerlerini ifade eder [21, 22].

Islah çelikleri (QT), ısıtılardan sonra kazandıkları mekanik özellikleri sayesinde, çeşitli makina, taşıt motor ve aparat yapımında kullanılan parçalar, krank milleri, akslar, piston kolları, türbin parçaları, miller, pimler, çeşitli civata ve somunlar, tahrik aksamı, dişlilerin imalatında kullanılabilirlerdir. Belirtine bu malzemelerin üretimi için yapılacak malzeme seçimi ne kadar önemli ise, uygulanacak ıslah işlemi de aynı derecede önem ihtiva etmektedir [21, 22].



Şekil 3.1. İslah çelikleri ile imal edilen xz çeşitli makina ve araç parçaları (krank mili, civata ve somunlar, aks, piston) [21].

İslah çelikleri, sertleşebilme yeteneklerine göre düşük, orta ve yüksek derecede sertleşebilir ıslah çelikleri şeklinde sınıflandırılabilir. Genel sınıflandırmaları ise aşağıdaki gibidir [21, 22]:

- Alaşım-sız ıslah çelikleri,
- Mangan alaşım-lı ıslah çelikleri,
- Krom alaşım-lı ıslah çelikleri,
- Krom - Molibden alaşım-lı ıslah çelikleri,
- Bor alaşım-lı ıslah çelikleri [21, 22].

Alaşım elementleri içermeyen çeliklerde, ıslah dayanımı karbon miktarıyla artmaktadır. Mangan alaşım-lı ıslah çeliklerinde mangan setreleşebilirliği arttırdığından 30Mn4 ve 40Mn4 çeliklerinde akma sınırı C60 çeliğindeki özellikleri gösterir. Krom alaşım-lı ıslah çeliklerinde ise krom elementi sertleşebilirliği oldukça fazla artırır ve plastisiteye de olumlu katkı sağlar. Molibden kroma nazaran daha kuvvetli sertleşebilme yeteneğini artırır. Piyasa koşullarında en çok kullanılan ıslah çelikleri; 42CrMo4 (SAE 4140), 34CrNiMo6 (SAE 4340), 41Cr4 (SAE 5140),

34CrMo4 (4135), 50CrMo4 (SAE 4150), C40 (SAE 1040), C45 (SAE 1045), C50 (SAE 1050), C60 (SAE 1060) çelikleridir [21, 22].

Tablo 3.1. Islah çeliklerinin kimyasal kompozisyonları [23].

ISLAH ÇELİKLERİ KİMYASAL KOMPOZİSYONLARI											
Mlz.No	Sembol/DIN	AISI/SAE	C	Si	Mn	P (max.)	S (max.)	Cr	Mo	Ni	V
1.1186	C40	1040	0,37	0,015	0,5	0,035	0,035				
			0,44	0,35	0,8						
1.0503	C45	1045	0,42	0,15	0,5	0,045	0,045				
			0,5	0,35	0,8						
1.0540	C50	1050	0,47	-	0,6	0,045	0,045				
			0,55	0,4	0,9						
1.0601	C60	1060	0,57	0,15	0,6	0,045	0,045				
			0,65	0,35	0,9						
1.7035	41Cr4	5140	0,38	0,15	0,6	0,035	0,035	0,9			
			0,45	0,4	0,9			1,2			
1.7218	25CrMo4	4130	0,22	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,29	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7220	34CrMo4	4135	0,3	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,37	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7225	42CrMo4	4140	0,38	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,45	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7228	50CrMo4	4150	0,46	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,51	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.6511	36CrNiMo4	9840	0,3	0,15	0,4	0,035	0,035	0,9	0,15	0,9	
			0,38	0,4	0,7			1,2	0,3	1,2	
1.6582	34CrNiMo6	4340	0,3	-	0,5	0,025	0,035	1,3	0,15	1,3	
			0,38	0,4	0,8			1,7	0,3	1,7	
1.8159	50CrV4	6150	0,47	0,15	0,7	0,035	0,035	0,9			0,1
			0,55	0,4	1,1			1,2			0,2

3.2. SAE (AISI) 4140 Islah Çeliği ve Özellikleri

AISI 4140 çeliği düşük alaşım elementlerine sahip olan bir krom-molibden çeliğidir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan ıslah çeliği türüdür. AISI 4100 serisi çelikler, orta karbonlu çelik, alaşımlı çelik, düşük alaşımlı yapı çeliği ve dövme kalite çeliği olarak ta adlandırılmaktadır [20].

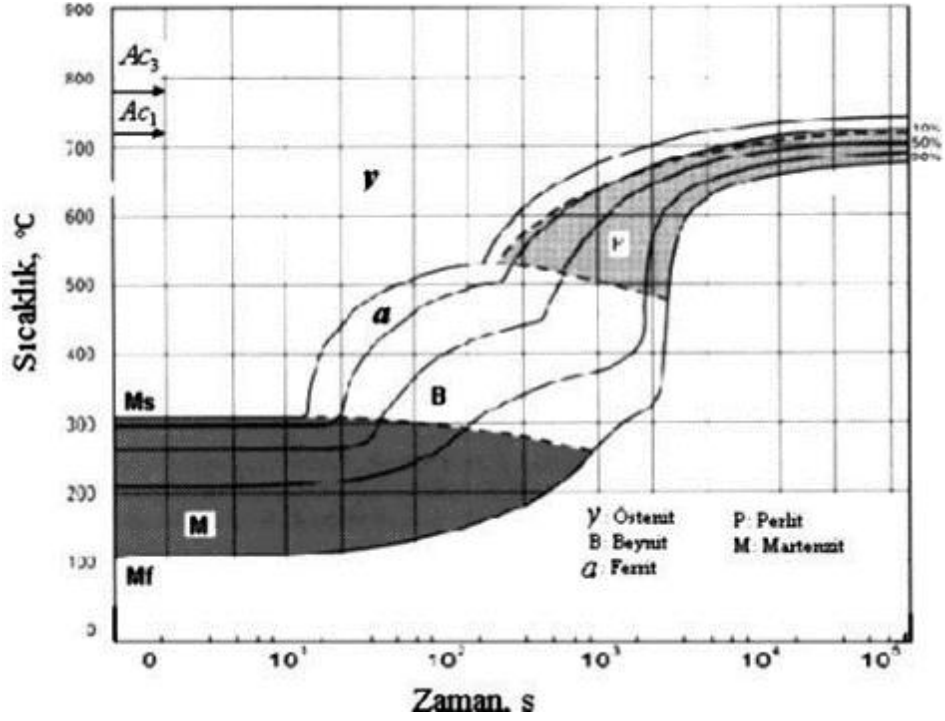
Tablo 3.2. İslah çeliklerinin mekanik özellikleri [23].

İSLAH ÇELİKLERİ			MEKANİK ÖZELLİKLER											
			Akma Sınırı (Re)			Çekme Dayanımı (Rm)			Uzama (A)			Çentik Darbe (DVM)		
			≤16	>17	>41	≤16	>17	>41	≤16	>17	>41	≤16	>17	>41
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Mlz.No	Sembol	AISI SAE	≥ MPa (Min.)			MPa			≥ % (Min.)			> J (Min.)		
1.1186	C40	1040	450	380	340	650	620	560	16	18	19	-	-	-
						800	770	710						
1.0503	C45	1045	500	430	370	700	650	630	14	16	17	-	-	-
						850	800	780						
1.0540	C50	1050	520	470	400	750	700	650	13	15	16	-	-	-
						900	850	800						
1.0601	C60	1060	580	520	450	850	800	750	11	13	14	-	-	-
						1000	950	900						
1.7035	41Cr4	5140	800	660	560	1100	900	800	10	12	14	30	35	35
						1200	1100	950						
1.7218	25CrMo4	4130	700	600	450	900	800	700	12	14	15	50	55	55
						1100	950	800						
1.7220	34CrMo4	4135	800	650	550	1000	900	800	11	12	14	40	45	50
						1200	1000	950						
1.7225	42CrMo4	4140	900	750	650	1100	1000	900	10	11	12	35	40	40
						1300	1200	1100						
1.7228	50CrMo4	4150	900	780	700	1100	1000	900	9	10	12	35	35	35
						1300	1300	1100						
1.6511	36CrNiMo4	9840	900	800	700	1100	1100	900	10	11	12	40	45	50
						1300	1200	1100						
1.6582	34CrNiMo6	4340	1000	900	800	1200	1100	1000	9	10	11	35	45	45
						1400	1300	1200						
1.8159	50CrV4	6150	900	800	700	1100	1000	900	9	10	12	35	35	35
						1300	1200	1100						

Tablo 3.1. ve Tablo 3.2.'de AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri belirtilmiştir [23]. AISI 4140 çeliği, diğer düşük alaşımlı krom-molibdenli çeliklerle kıyaslandığında sertleşebilme özelliği orta düzeydedir ancak tokluk ve mekanik direnç gibi özellikleri diğer çeliklere göre daha iyidir. Sertleştirme ve temperleme gibi ıslah ısıl işlemlerine elverişlidirler. AISI 4140 çelikleri yüksek düzeyde karbon içermesinden dolayı daha iyi sertleşir ve buna bağlı olarak ta mukavemeti artar. Ayrıca AISI 4140 çeliklerinde su verme ve temperleme sonrası 1650 MPa değerlerine kadar çekme mukavemeti elde edilebilir. Ancak bu çeliklerde yüksek mukavemet istenildiğinde, ısıl işlem uygulandıktan sonra hidrojen gevrekliği oluşabilir. Bu durumu önlemek amacıyla bu çeliklere 190 °C'de 2 ile 4 saat arasında temperleme ısıl işlemi yapılır [20].

Östenitleme sonrasında su verme işlemi ile sertleştirilen SAE 4140 çeliğinin sertliği, seçilen östenitleme sıcaklığı, soğutma ortamı, soğutma ortam sıcaklığı ve soğutma hızına bağlı olarak değişir. Temper öncesi martenzit yapısı temperlemeden sonra

temperlenmiş martenzit yapısı haline dönüşür. Malzeme kopmaya ve uzamaya karşı dayanıklı hale gelerek, yorulma dayanımı ve darbe tokluğu artırılmış olur [25].



Şekil 3.2. SAE/AISI 4140 çeliğine ait ısıtıl işlem TTT diyagramı [25].



Şekil 3.3. Su verme sonrası 350°C'de iki saat süreyle menevişlenmiş AISI 4140 çeliğine ait mikroyapı [26].

3.3. Islah Çelikleri İle SAE (AISI) 4140 Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti

QT (Quenched and Tempered) veya Q/T ile de ifade edilen bu çelikler kaynaklanabilir, ancak genellikle yüksek karbon içeriklerine ve dolayısıyla yüksek sertleşmeye sahip olduklarından, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) sert bir yapıya neden oldukları için, çatlak oluşumuna duyarlılık oluşturacağından her zaman belirlenmiş prosedürlere uymaya özen gösterilmelidir. TS EN 10277-5: 2008 çelikleri, bu tür çeliklerin iyi örnekleridir. Aksine, bazı QT çelikleri çok düşük karbon içeriği ve mükemmel kaynaklanabilirlik ile geliştirilmiştir [34].

Uygun kaynak sarf malzemelerinin seçiminde, özellikle de ana malzeme özelliklerinin birleştirilmesi gerektiği durumlarda dikkatli olunmalıdır. Bazı QT çeliklerinde, özellikle kaynak metalinin akma mukavemetinden ziyade çeliğin nihai gerilme mukavemetine uyması gerekiyorsa, bunu başarmak çok zor olabilir [34].

QT çeliklerinin ince kesitleri herhangi bir önemli kaynak problemi yaratmaz. Ana ve kaynak metali özelliklerini birleştirmek, kalın ve yüksek mukavemetli QT çeliklerinden daha kolaydır ve ITAB özellikleri, soğutma hızı yeterince büyük olduğunda korunur. ITAB yumuşamasını önlemek için ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklıklar sınırlandırılmalı ve ısı girdisi çelik tedarikçisinin veya ilgili standardın önerdiği değerin altında tutulmalıdır [34, 35].

AISI 4140 çeliği, krom ve molibden ile alaşımlıdır, dolayısıyla kromol çelik terimine girmektedir. Bu alaşım elementlerinin eklenmesi ve nispeten yüksek karbon içeriği (yaklaşık %0,40), bu düşük alaşımlı çeliğe mükemmel bir mukavemet/ağırlık oranı sağlar ve onu standart 1018 ve 1020 çeliklerden çok daha güçlü ve daha sert hale getirir. Dezavantajı, 4140 veya diğer orta ila yüksek karbonlu çelikleri kaynak yaparken, düşük karbonlu çeliğe kıyasla daha dikkatli olma ihtiyacıdır [36].

4140 çeliğinin tipine özgü olarak, ya su verilmiş ve temperlenmiş durumda (4140 QT olarak anılır) ya da tavlanmış durumda tedarik edilir. Kaynak için ikincisinin kullanılması önerilir. 4140 QT'de kaynak, ön ısıtma kullanıldığında bile yüksek

çatlama duyarlılığı nedeniyle önerilmez. 4140 QT'yi kaynaklamanız gerekiyorsa, parçaya orijinal temperleme sıcaklığının (15°C) altındaki bir sıcaklıkta gerilim giderme tavı yapılması gereklidir. 4140 QT'de kaynaklı imalat yapılması gerekiyorsa, tamir kaynağı ihtiyacı da doğmaktadır. Bu nedenle 4140 QT çeliği, mümkünse standart imalat için kullanılmamalıdır [36].

Çatlak oluşumunu önlemek için, kaynak işleminden önce 4140 malzemeyi ısıtmanız gerekir. Bu işlem, kaynak yapıldıktan sonra soğutma hızını yavaşlatmak ve çatlama neden olabilecek gevrekleşmeyi (martensit oluşumu, kaynak ve ITAB bölgesinin sertleşmesi) önlemek için yapılır. ASTM Handbook kitabının Ark Kaynak Prosedürüne göre aşağıda belirtilen şekilde ön ısıtma yapılmalıdır [36]:

- 12,7mm kalınlığa kadar: 205 – 260 °C
- 12,7 – 50,8mm kalınlık arası: 316 – 371 °C'dir.

Daha yüksek sıcaklıklar, daha yavaş soğutma hızları üretecektir. Pasolar arası sıcaklığın ön ısıtma sıcaklığında veya üzerinde tutulması önemlidir. Birden fazla geçiş gerekiyorsa, parçanın minimum pasolar arası sıcaklığın üzerinde olduğundan emin olunması gerekir; eğer değil ise, oksigaz veya başka yollarla parçaya daha fazla ısı uygulanmalıdır. Kaynak sonrası dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ta parçanın yavaş soğutulmasıdır. Ön ısıtma bunu çoğu zaman halleder; ancak yavaş bir soğutma hızı sağlamak için ısıtma battaniyeleri kullanmak iyi bir uygulamadır. Yukarıda bahsedildiği gibi, yavaş bir soğutma hızı ITAB bölgesinde gevrekleşmeyi önler veya azaltır. Aynı zamanda hidrojenin kaynağı terk etmesi için daha fazla zamana izin verir, böylece hidrojen kaynaklı çatlama olasılığını da azaltır [36].

3.4. DIN C45 Çeliği ve Özellikleri

Alaşımız ıslah çelik grubunda ve orta karbon çelik sınıfında bulunan DIN C45 çeliği; mekanik özellik olarak yapısında bulunan karbon oranına bağlı olarak değişir. Sertleşme yetenekleri azdır, sertleştirme işlemlerinden sonra parçada çatlama ve çarpılmalar meydana gelebilir. Kalın kesitli parçalar ise istenilen düzeyde

sertleştirilemeyebilirler, bunun için parça geometrisine göre önceden ısıtılma işlemi fizibilitesi çalışmak gerekir. Korozyona karşı dayanımları ise azdır [27].

%0,42 - 0,5 oranları arasında karbon içeren bu çelik türü, içerdiği karbon oranına bağlı olarak, ısıtılma işlemi sonrası istenen orta sınıf mekanik özelliklere sahip olabilirler. Isıtılma işlemi için çok uygun çeliklerdir. Dolayısıyla ısıtılma işlemi sonrası bu tür çeliklerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri değiştirilebilir özelliktedir. Su verme sonrası sertleşen çelik aşınmaya karşı dirençli hale gelir. Özellikle makina imalat sanayisinde çok tercih edilen çeliklerdir. İşlenebilirlik kabiliyetleri, şekil alma kabiliyetleri ve kaynak kabiliyetleri iyi özelliktedir. Karbon oranının düşük karbonlu çeliklere göre yüksek olmasından dolayı özellikle kaynak esnasında meydana gelen kontrolsüz ısıtılma etkileri çelikte kontrolsüz yapısal değişimlere ve hatalara neden olabilir. Bu nedenden dolayı orta karbonlu çeliklerin özellikle alaşım elementi içeren türlerine kaynaklı imalatlarda özen gösterilmeli ve kontrollü işlem yapılmalıdır [27].

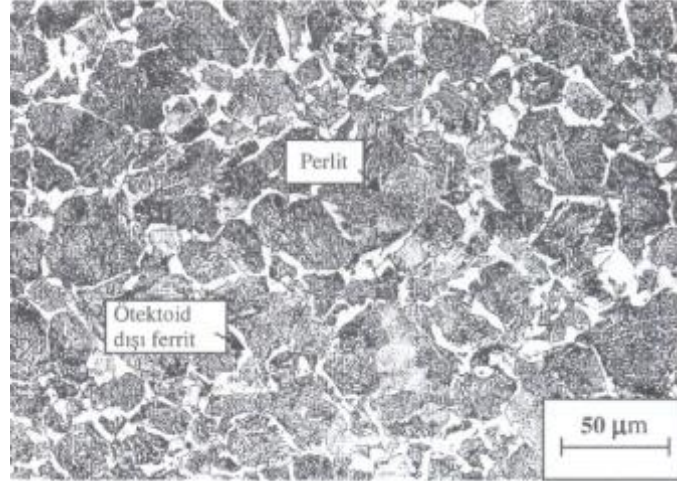
Tablo 3.1. ve Tablo 3.2.'de DIN C45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri belirtilmiştir [23].

Ülkemiz sanayisinde bu çelik grubu; C45 ya da Ck45 ismiyle kullanılır. Genellikle bu iki çelik birbiriyle aynıymış gibi değerlendirilebilir. Fakat C45 genel amaçlı karbon çeliğini ifade ederken, Ck45 vasıflı karbon çeliğini ifade etmektedir. İçerdikleri kükürt ve fosfor oranları dikkate alındığında Ck45 çeliğinin C45 çeliğine göre daha temiz ve kaliteli bir çelik olduğu anlaşılır. C45 ve Ck45 arasındaki bu ayrım Tablo 3.3.'te gösterilmiştir. DIN normunda Ck45 gösteriminin yerini EN normunda C45E almıştır [27].

Tablo 3.3. C45 ve Ck45 kalite çeliklerin ayrımı [27].

Çelik	Tanım	Fosfor (P)	Kükürt (S)
C45	Genel amaçlı kaliteli karbon çelikleri	Max. 0,060	Max. 0,060
Ck45	Genel amaçlı vasıflı karbon çelikleri	Max. 0,035	Max. 0,035

C45 çelikleri kullanım alanları olarak; Otomotiv parçalarında, kam mili, dişli çarklar, şaftlar, mil yatakları, krank milleri, çubuklar ve parçalar, makine parçalarında, çelik üretim proseslerinde, el aletleri gibi parçaların imalatında kullanılmaktadır [27].



Şekil 3.4. %0,5 C içeren çeliğin sıcak dövme sonrası oluşmuş kaba taneli ve homojen olmayan mikroyapısı [28].

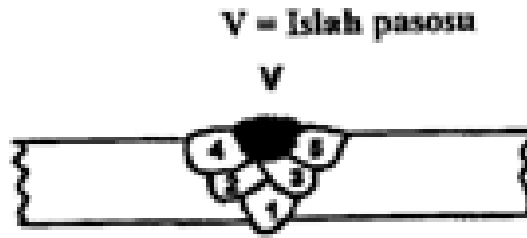
3.5. DIN C45 Çeliği Kaynak Kabiliyeti

Bu çeliklerin yüzde karbon içeriği %0,42 - 0,5 arasında değişir. Ark kaynağı ile minimum hata ile kaynak edilebilirler. Ergime hattında ITAB bölgesinde martenzit oluşumu ve bu yapının sert karakterde olması sebebiyle (karbonun fazla olmasından) ön tavlamanın, son tavlamanın veya her ikisinin birden uygulanmasını gerektirebilir. Çok hızlı kaynak soğuma hızları oluşturan bağlantı tasarımlarında ve kaynak işlemlerinde, martenzit oluşumunu engellemek için ön tavlama yapmak gerekir. Kaba martenzit yapısını menevişlemek ve ITAB'daki tokluğu iyileştirmek amacıyla da kaynak sonrası ısıl işlem uygulanabilir. Kaynaklı imalatlarda örnek verecek olursak, büyük "V" kaynak ağzı tercih etmek veya çok pasolu kaynak işlemi yapmak gibi bazı modifikasyonlar soğuma hızını ve dolayısıyla da çatlama olasılığını azaltır. Çelikteki yüzde karbon içeriği arttıkça ark kaynağı için dolgu metali seçimi kritik hale geldiğinden, düşük hidrojenli bazik kaynak dolgu metalleri kullanmak gerekir. Yüzde karbon içeriği %0,5'e ulaştığında ise düşük hidrojenli bazik dolgu metallerinin kullanılması çok doğru olur [33].

Soğuk çatlakların oluşması hususunda çeliğin kaynağa tam olarak uygunluğunun sağlanabilmesi için, karbon oranı %0,2'den ve fosfor oranının da %0,05'den küçük olması gerekmektedir. Daha yüksek olması durumunda ITAB bölgesinde sertleşme meydana gelir. Bu da kılcal çatlakların oluşmasına neden olur. Kılcal çatlakların

oluşması da orta karbonlu çeliklerin kaynağında karbon oranı arttıkça belirli önlemlerin alınmasını zorunlu kılar. Kaynak hızını yavaşlatmak, daha büyük çaplı elektrotlar kullanmak, akım şiddetini arttırmak ITAB'da daha yüksek ısınma sağlayabilir, bunun sonucu olarak ta kaynağa yakın bölgede daha geniş bir alanda tane irileşmesi meydana getirecektir, böylece ITAB'da soğuk çatlak riskini azaltacaktır. Malzeme kalınlığı arttıkça tane irileşmesi sağlanan alan azalacağından soğuk çatlak riski de artacaktır [38].

Bütün bu tedbirler ITAB'ın sertleşmesinin önüne geçebilmek için bir derece tedbir olmakla beraber karbon ve fosfor oranı koşullu olarak kaynağa uygun olan malzemeler için en önemli tedbir ön tav yapmak ve pasolar arası sıcaklığı kontrol etmektir. Ne kadar süre ön tav yapılması gereği ise karbon eşdeğeri formülünden belirlenir. Bilindiği üzere alaşım elementleri belli karbon oranındaki çeliğin maksimum sertliğini belirlememekle beraber, sertleşme derinliğini belirlediğinden alaşım elementlerinin fazla olması ITAB bölgesinde daha fazla sertleşmiş bölge olmasını beraberinde getirir. Alaşimsız çeliklere kaynak yapılırken en kritik önemli unsur karbon ve fosfor miktarıdır. Alın kaynaklarında daha önceki pasolar nedeniyle oluşan ısı girdisi sonucunda ITAB bölgesini menevişlemek amacıyla ıslah pasosu uygulanabilir [38].



Şekil 3.5. Islah pasosu uygulamasının gösterimi [39].

Ön tav sıcaklığını, kaynağa başlamadan önce iş parçasının o anda kaynak edilecek bölgesinde elde edilmesi gereken sıcaklık olarak tanımlarız. Malzeme kalınlığı arttıkça gereken ön tav sıcaklığı da artar. Bu sıcaklığın ideal değeri aşağıda verilmiştir [39]:

100°C - 300°C arası sıcaklıktır. Kalınlık, karbon ve alaşım elementi içeriğine göre belirlenir. Genel olarak karbon oranı %0,25 - 0,5 arası alaşımsız ve karbon oranı %0,2 - 0,25 arası olan alaşımlı çeliklerin kaynağında uygulanır [39].

BÖLÜM 4. YAPI ÇELİKLERİ

4.1. Yapı Çeliklerinin Genel Özellikleri

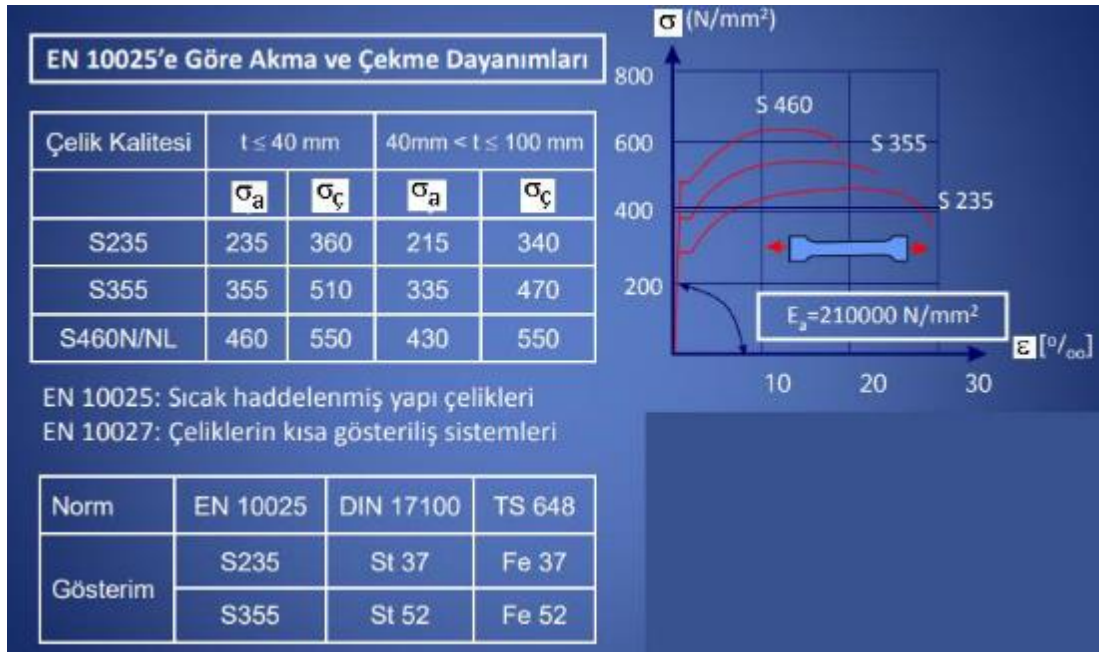
Yapı çelikleri, çelik üretimi içinde en yüksek paya sahip çeliklerdir. Diğer çeliklerle kıyaslandığında fiyat ve bulunabilirlik açısından daha avantajlı olan genel yapı çelikleri piyasada kullanılan çeliklerin yaklaşık %75 - 80'ini oluşturmaktadır. Alaşimsız ve çoğunlukla kitle çeliği olarak, sıcak şekillendirmede sonra normalize edilmiş bazen de soğuk çekilmiş olarak kullanılırlar. Bu grup çelikler, özellikle çekme dayanımları ve akma sınırları dikkate alınarak endüstriyel ve yapısal uygulamalarda kullanılırlar. Çekme dayanımına göre ifade edilen yapı çelikleri, öncelikli olarak çekme gerilmeleri ve akma sınırı değerleri dikkate alınarak; çelik konstrüksiyon, yer altı ve yer üstü inşaatı, köprü, stadyum, alışveriş merkezleri, basınçlı kap ve donanımları, taşıt imalatı ve makine konstrüksiyonları gibi çeşitli mühendislik dallarında kullanılmak üzere tercih edilirler. Yapı çelikleri genellikle alaşimsız çelik olarak tanımlanır, mekanik dayanımları da daha çok karbon miktarına bağlıdır. Ancak azot, fosfor gibi elementler başta olmak üzere, üretim hammaddelerinden ve üretim şekillerinden kaynaklanan mangan, silisyum, bakır ve kükürt elementleri de oldukça etkilidirler [27].

Çelik piyasasında en fazla kullanılan kaliteleri ise St37 (S235) ve St52 (S355) türleridir.

4.2. St52 (S355) Yapı Çelikleri

St52 (S355) çelikleri, çelik konstrüksiyon yapılarında sıkça kullanılan DIN 17100 standardına göre çekme dayanımı 52 kgf/mm^2 olan yapı çeliği türüdür. Başındaki "St" ifadesi Almanca çelik anlamındaki "stahl" kelimesinden gelir. TS EN 10025 normunda

ise S355 olarak gösterilmektedir. Yapı çeliği; otomotiv ve savunma sanayisinde, endüstriyel binalarda, demiryolları ve köprü konstrüksiyonlarında, zemin altyapı projelerinde, denizde yapılan dalgakıranlarda ve gemi imalatı gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Çelik konstrüksiyonlarda St52 (S355) levha parçaların birbirlerine ve diğer çelik parçalara birleştirilmesi civata, kaynak ve perçin gibi çeşitli birleştirme yöntemleri ile yapılmaktadır [40].



Şekil 4.1. Kaynaklanabilir bazı yapı çeliklerinin mekanik özellikleri ve normlara göre simgeleri [41].

Tablo 4.1. St52 (S355) çeliğinin kimyasal kompozisyonu.

Malzeme	C (max.)	Si (max.)	Mn (max.)	P (max.)	S (max.)	N (max.)	Cu (max.)	Diğer
St52 (S355)	0,22	0,55	1,6	0,035	0,035	0,012	0,55	-

Alaşımsız çelik sınıfına giren bu çelik, daha çok haddelenmiş durumda, fakat kısmi olarak normal tavlı üretilirler ve kullanılırlar. Bu nedenle, haddeleme sıcaklığında yapılan ısıl işlem, bu çelik türlerinde önemi yadsınamaz bir prosestir ve kontrollü olarak haddeleme sıcaklığından yararlanılarak yapılan normal tavlama işleminde karbon içeriğince yüksek mekanik özelliklere ulaşılabilir; kontrollü haddeleme ile uygulanacak termomekanik işlemlerle ise yüksek darbe tokluğu özelliklerine ulaşılabilir. Kullanım yerlerine göre de bu özellikler üretim aşamasında belirlenir [27].

4.3. Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği

Yapı çeliklerinde; levha kalınlığı, kaynak türleri, kaynak parametreleri ve kaynağın soğuma koşullarına bağlı olarak kaynak bölgesinde çok farklı mikroyapılar oluşabilmektedir. Yapı çeliklerinin birleştirilmesinde oldukça yaygın olarak kullanılan MIG/MAG kaynak türünün kullanımının artması ile bu yöntemde kullanılan koruyucu gazların geliştirilmesi, çeşitli gaz karışımları ile yapılan kaynak bağlantılarında kaynak dikişi özelliklerinin incelenmesi yolunda araştırmalar sürmektedir. Bu çeliklerde MIG/MAG ve tozaltı kaynak yöntemi çoğunlukla kullanılır. Fakat MIG/MAG kaynağına kıyasla tozaltı kaynak yöntemi, tam otomatik olarak yapılabilmesi nedeniyle, düşük kalınlıktaki bu çeliklerde daha derin nüfuziyet ve daha kusursuz kaynak elde edilmesine olanak sağlar [40].

Kaynaklanabilirlik açısından TS EN 137 standardı, bu tür çeliklere katılan alaşım elementlerinin azami miktarlarını sınırlandırılmıştır. Bu çeliklere katılan alaşım elementlerinin azami miktarları Tablo 4.2.'de verilmiştir. Buna göre çelik imalatçısı, ürünün boyutlarına ve beklenen mekanik özelliklere göre bu sınırları aşmamak koşulu ile Tablo 4.2.'de belirtilen alaşım elementlerinden gerekenleri tercih eder [27].

Tablo 4.2. Kaynaklanabilirlik açısından TS EN 137'ye göre çeliklere katılan alaşım elementlerinin azami miktarları [27].

Alaşım Elementi	Azami Miktar (%)	Alaşım Elementi	Azami Miktar (%)
C	0,2	Cr	2,00
Si	1,00	Cu	1,5
Mn	2,00	Mo	1,00
P	0,025	Nb	0,1
Si	0,025	Ni	2,00
N	0,02	Ti	0,2
B	0,005	V	0,2
Zr	0,15		

BÖLÜM 5. ZIRH ÇELİKLERİNDE KULLANILAN KAYNAKLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında kullanılan yöntemler; Elektrik ark, gaz altı, ergimeyen tungsten elektrik ark kaynak ve tozaltı gibi kaynak yöntemleridir. Bunlardan en çok tercih edilen elektrik ark kaynak yöntemi, hidrojen çatlağı riskinin en fazla olduğu yöntemdir. Bunun sebebi tercih edilen örtülü elektrodun nemlenmesi sonrası kaynak banyosuna giren hidrojenin soğuma sonrasında genişerek çatlak oluşturmaktadır. Elektrik ark kaynak yönteminde kullanılan kaynak dolgu elektrodlarının hidrojen içeriklerinin düşük olanları tercih edilmeli ve kaynak öncesi elektrodlar fırınlarda kurutulmalıdır [2, 30].

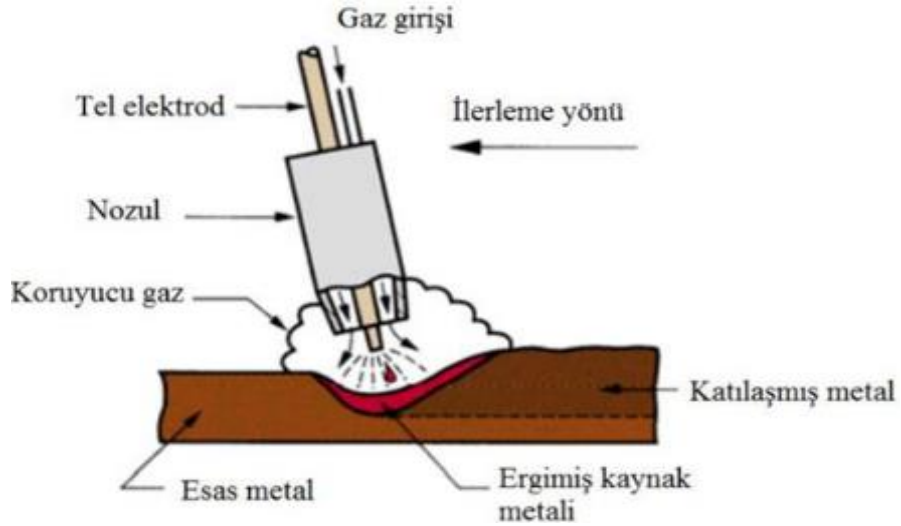
Teknolojiye ve otomasyona uygun olan gaz altı kaynak yöntemleri gün geçtikçe sektörde daha yoğun kullanım alanı bulmakta ve tercih edilmektedir. Gaz altı kaynak yöntemlerinde kullanılan dolgu metalinin elektrodlar gibi örtü yapısı olmadığından, kaynak esnasında nemden düşük oranda etkilenen kaynak banyosu sağlanır. Yine de zırh çeliklerinin gaz altı kaynak uygulamalarında hidrojen içeriği düşük dolgu metalleri tercih edilmelidir. Kaynak dikişlerinin doğrusal ve boyutlarının uzun olması durumunda ise otomasyona uygun toz altı kaynak yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntem daha hızlı kaynak dolgusu sağlayarak, kalınlığı yüksek olan çalışmaların seri kaynak imalatlarında büyük tasarruflar sağlar. Yine toz altı kaynak yönteminde kullanılan tozun hidrojen içeriği ve fırınlama işlemleri hususlarına dikkat edilerek, olası çatlak riskleri minimize edilmelidir [4, 30, 42].

Yukarıda belirtilen zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında kullanılan yöntemlerden sadece, bu çalışmada kullanılan MIG/MAG gaz altı kaynak yöntemi aşağıda alt başlık olarak anlatılmıştır.

5.1. MIG/MAG Gaz Altı Kaynağı

Gazaltı kaynağı, kaynak için gerekli ısının, tükenen bir elektrod ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Kaynak bölgesine sürekli şekilde beslenen (sürülen), masif haldeki tel elektrod ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturur. Elektrod, kaynak banyosu, ark ve iş parçasının kaynağa yakın bölgeleri, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak torcundan gelen gaz veya karışım gazlar tarafından korunur. Gaz, kaynak bölgesini tam olarak koruyabilmelidir, aksi halde çok küçük bir hava girişi dahi kaynak metalinde hatalara neden olur [43].

Eriyen metal elektrot ve soy gaz kullanımı nedeniyle yönteme MIG (Metal inert gas) kaynağı adı verilmiştir. Yöntemde daha sonra düşük akım yoğunlukta ve darbeli akımla çalışma, daha değişik metallere uygulama ve koruyucu gaz olarak aktif gazların ve gaz karışımlarının kullanılması gibi işlemler meydana gelmiştir. Bu gelişmeler, aktif koruyucu gazın kullanıldığı yönteme MAG (Metal active gas) kaynağı adının verilmesine neden olmuştur [4].

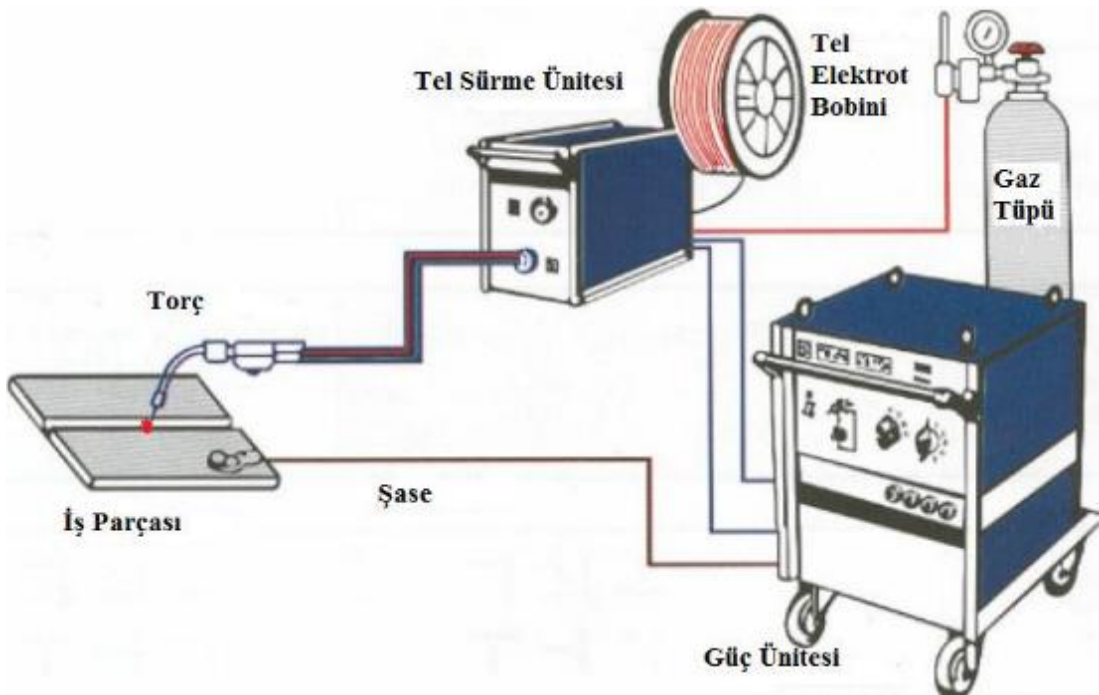


Şekil 5.1. MIG/MAG gaz altı kaynağı ark bölgesi [4].

Kaynak akımı, belirli bir elektrot çapı, bileşimi ve serbest elektrot boyu (kontak borusu mesafesi) için elektrot ilerleme hızı ile orantılıdır. Uygun ölçüde bir sabit gerilimli akım üretici, belirli bir ark geriliminde (ark boyunda) elektrotu belirli bir hızda eritir [4].

Ark gerilimi ve ark boyu, birbiriyle alakalı kavramlardır. Kaynak makinesi üzerinden okunan ark gerilimi, kaynak devresindeki gerilim düşüşlerinin toplamıdır. Bu nedenle ark gerilimi, ancak diğer devre elemanlarının sıcaklıkları sabit olduğunda makinede görünen değerlerle orantılıdır [45].

Yapmış olduğumuz çalışmada Magmaweld firmasının gazaltı kaynak makinası olan RS 500 MW 500 Amper'lik 3 fazlı konvansiyonel kaynak makinası kullanılacaktır. Şekil 5.2.'de MIG/MAG gazaltı kaynağının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.2. MIG/MAG gazaltı kaynağı şematik gösterimi [44].

BÖLÜM 6. KAYNAKLARIN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENELERİ

Kaynaklı imalat muayeneleri; Amerika normlarında ASME Sec.IX standardı kapsamında, Avrupa normlarında ve ülkemizde TS EN ISO 15614 standardı kapsamında yapılmaktadır. Bu standartlar, kaynaklı imalat sonrası uygulanması gereken tahribatlı ve tahribatsız testleri de belirtmektedir. Zırh çeliklerinin kaynak prosesinin uygunluğunun belirlenmesi için de, iki ana grup olarak bu muayene prosedürleri kullanılmaktadır [4].

6.1. Tahribatsız Muayene

Tahribatsız Muayene (Non Destructive Testing - NDT) yöntemleri, en basit anlatımıyla, malzemenin tasarımsal bütünlüğüne hasar vermeden uygulanan test ve kontrol metodudur. Muayene edilecek parçaya herhangi bir tahribat uygulamadan, yüzeyde ve iç yapıdaki süreksizliklerin belirlenmesi için kullanılan yöntemdir. Ayrıca tahribatsız yöntemler malzemelerin boyut, görünüş veya alaşım içeriği, sertlik, tane boyutu gibi diğer karakteristik özelliklerini tayin etmede de kullanılır [4].

Tahribatsız muayene yöntemlerinin gelişen teknolojiye önemi oldukça büyüktür. Özellikle çelik sektöründe üretimde veya mamül/yarımamül imalat işlemleri sonrası oluşan hataların belirlenmesinde kullanımı yaygındır.

Tahribatsız muayene, kaynaklı imalat için de sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Hataların, kaynak dikişinde ve ITAB bölgesinde oluşmaması ve kabul edilebilir seviyede olması beklenir. Aksi durumda bu hatalar malzemede zaafiyet oluşturur, beklenmeyen deformasyonlara ve kullanım ömrünün kısıtlı olmasına neden olabilir. Kaynaklı birleştirmelerde oluşan hataları belirlemek için; istenilen kaynak kalitesine, kaynak dikişinin kalınlığına, malzeme yapısına, seçilen kaynak yöntemine, malzeme

kullanım yerine ve tahmin edilen hatanın türüne ve lokasyonuna bağlı olarak en uygun tahribatsız muayene yöntemi belirlenmelidir. Bu seçim yapılırken uluslararası standartlara, uygun malzemeye, müşteri istekleri ve anlaşmalar dikkate alınmalıdır [2, 46].

Malzeme türlerine göre her test yöntemleri yapılamadığı gibi, aynı malzeme üzerinde yapılabilecek tüm testleri de uygulamak doğru bir metod olmaz. Tahribatsız muayene yöntemleri genel anlamda altı ana başlıktan oluşmaktadır. Bunlar [2]:

- Gözle muayene (VT)
- Sıvı emdirme (Penetrant Sıvısı) ile muayene (PT)
- Girdap akımları (Eddy Akımı) ile muayene (ET)
- Manyetik parçacık ile muayene (MT)
- Ultrasonik muayene (UT)
- Radyografik (Röntgen) ışınları ile muayene (RT) [2, 4].

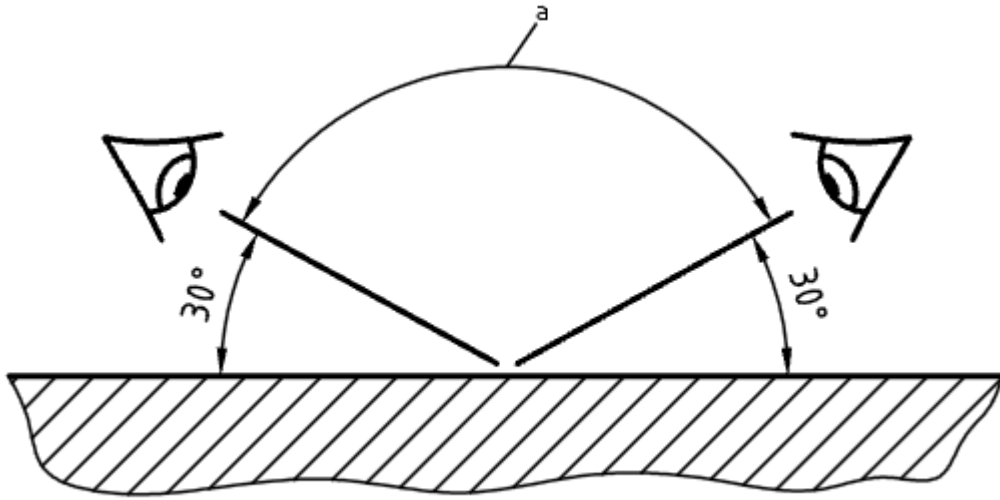
Yapmış olduğumuz tez çalışmasında, yukarıdaki yöntemlerden 1., 2. ve 6. muayene yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan bu muayene yöntemleri alt başlık olarak aşağıda anlatılmıştır.

6.1.1. Gözle muayene (VT)

Bir ürünün yüzeyinde bulunan süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilme yöntemidir. Gözle muayene çok basit bir metod olarak görünse de en önemli muayene metodudur. Genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır. Zaten diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir. Bu yöntem, metalik veya metalik olmayan bütün malzemelere uygulanabilir. Muayene yüzeylerine ulaşabilirlik durumuna göre gerektiğinde endoskoplar ve el feneri gibi yardımcı gereçler de kullanılarak uygulanabilir. Çoğu durumda muayene yüzeyi hazırlığı olarak

yüzey temizliği yapılması istenmez. Sebebi ise beklenen hataların en iyi görüneceği şekilde olması gereklidir [47].

Bu muayene, uygun ışık ortamında ve uygun olarak gözle bakma açılarındaki inceleme yapılmalıdır. Muayene için tavsiye edilen minimum ışık şiddeti 500 lux; minimum açı 30° ve parçaya olan maksimum uzaklık 300mm olacak şekilde olmalıdır. Metalik veya metalik olmayan bütün malzemelere uygulanabilir [48].



Şekil 6.1. Görsel muayenede bakış açısı [48].



Şekil 6.2. Çubuk endoskop [2].

Doğrudan gözle muayenede inceleme bölgesine erişimin mümkün olmadığı durumlarda, dolaylı muayene yöntemleri kullanılarak kontrol sağlanır. Bu muayene yönteminde ayna, videoskop, kamera, fiberoskop, boroskop gibi yardımcı aletler kullanılır [46].

6.1.2. Penetrant sıvısı (sıvı emdirme) ile muayene (PT)

Yüzey hatalarının tespitinde kullanılan bu yöntem, tespit edilmesi istenen hataların muayene işlemi uygulanacak yüzeylerde açık olması gereklidir. Yüzeyle bağlantısı olmayan ve yüzeylerin altında kalan ve malzemelerin içerisinde bulunan süreksizliklerin tespitinde bu yöntem kullanılamaz. Metalik veya metalik olmayan tüm malzemelerde gözenekli yapıların fazla olmamaları şartıyla tespit gerektiren yüzey hatalarının görülmesi için kullanılır [47].

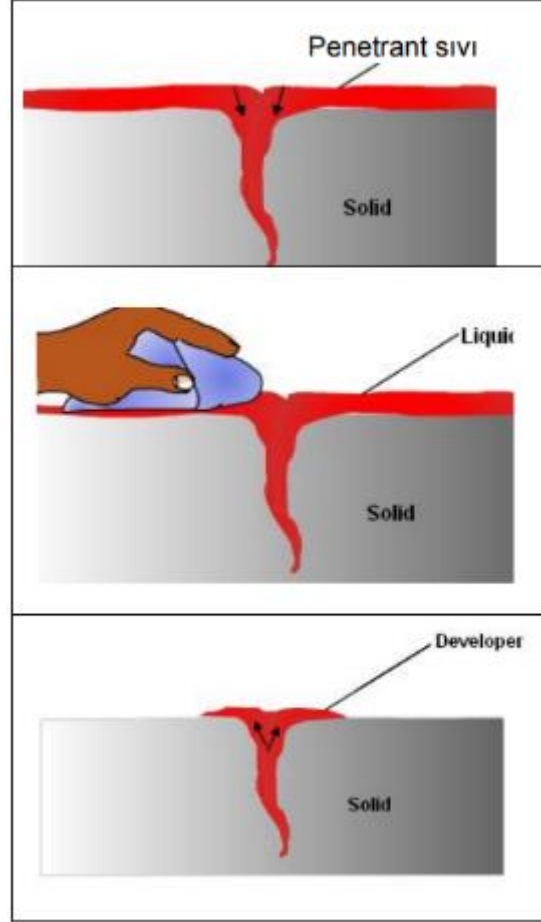
Muayene edilecek malzemelerin yüzeyleri temiz ve düzgün durumda olmalıdır. Aksi durumda test sonrası değerlendirme aşamasında yanılığa düşülebilir. Muayene sonrasında da muayene yapılan yüzeyler temizlenmelidir. Test için kullanılan kimyasalların uygulamasında kullanıma itina gösterilmeli ve sağlık açısından kişisel koruyucu ekipmanlar mutlaka kullanılmalıdır [47].

Penetrant sıvısı, vizkositesi, yüzey gerilimi ve yoğunluğu ile nitelendirilip, görünebilmesi için ise boya veya floresant kullanılır. Penetrant muayenesinde kullanılan diğer sıvılar ise temizleyici (cleaner) ve geliştiricidir (developer) [47].

Penetrant muayene metodunun uygulama sıralaması aşağıdaki gibidir [47];

- Muayene yüzeyinde ön temizlik,
- Penetrantın uygulanması,
- Penetrasyon için bekleme,
- Ara temizlik,
- Geliştirme,
- İnceleme,

- Değerlendirme ve rapor hazırlama,
- Son temizlik.



Şekil 6.3. Penetrant muayenesi uygulama aşamaları [47].

Penetrant muayenesinde ilk kural temizlik olmazsa olmazdır. Muayene yapılacak yüzeyler her türlü yağ, kir, pas ve cüruf vb. gibi kirliliklerden mekanik yada kimyasal yolla arındırılarak, ön temizleme işleminden sonra penetrant sıvısı yüzeylere uygulanır. Penetrant sıvısının kapiler etki ile süreksizliklere yeterince nüfuz edebilmesi için 15-30 dakika arasında beklenilir. Yeterince bekleme sonrası hatalara nüfuz etmiş penetrantın yüzeyde kalan fazla kısmı su, gaz tipi çözücüler veya temizleyici solüsyonlar (cleaner) ile temizlenerek, incelenecek yüzeylerin bez ile uygulama veya sıcak hava üflemesi ile kurutulması sağlanır [47].

Süreksizlikler ve hatalar bulunan penetrant sıvısı emdirilmiş ve kalıntıları temizlenmiş yüzeye, güçlü emiciliğe ve penetrant sıvısı ile uygun viskoziteye sahip geliştirici, ince bir film tabakası halinde uygulanır. Yüzeye serpilen geliştirici, süreksizlikler ve hatalar içerisindeki penetrant sıvısını emerek kapiler etki ile yüzeye çıkmasını ve geliştirici sayesinde de büyük olarak görünmesini sağlar. Uygulama şekli yukarıdaki Şekil 6.3.'te görülmektedir [47].



Şekil 6.4. Alüminyum kaynağı dikişinde penetrant muayenesi sonrası görülen krater çatlakları.

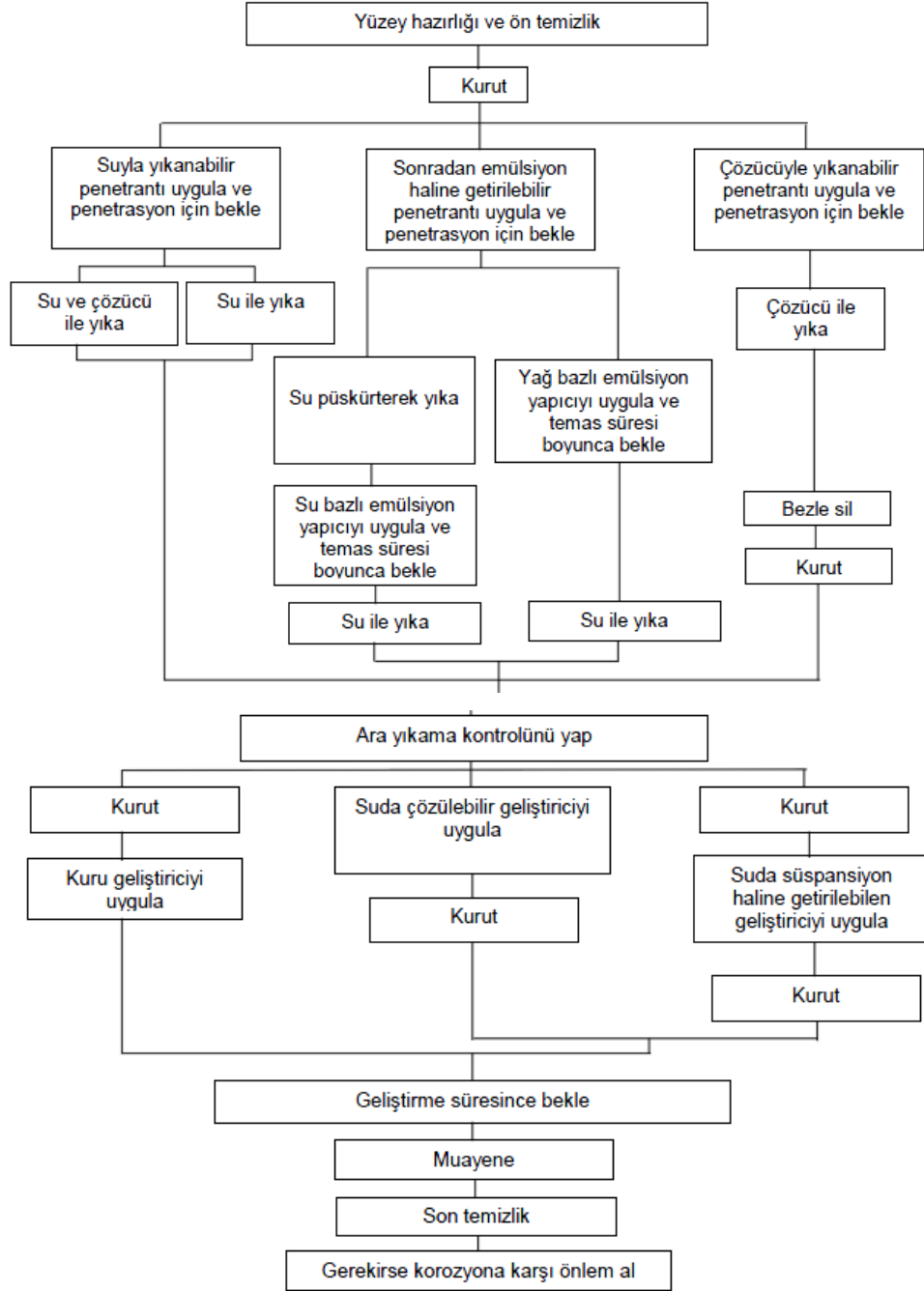
Penetrant muayene testinde farklı tür penetrantlar ve bunların birbirine göre farklı uygulama metodları vardır. Şekil 6.5.'te detaylı olarak uygulanış yöntemleri verilmiştir [2].

Avantajları [48];

- Ekonomik bir yöntemdir,
- Hemen hemen tüm malzemelere uygulanabilmektedir,
- Ekipmanların taşınması kolaydır.

Dezavantajları [48];

- Sadece yüzeye açık olan hatalar ve süreksizlikler belirlenebilir,
- Manyetik parçacık testine göre daha yavaş bir prosestir,
- Pürüzlü yüzeylere uygulanması durumunda yanılma ihtimali yüksektir.

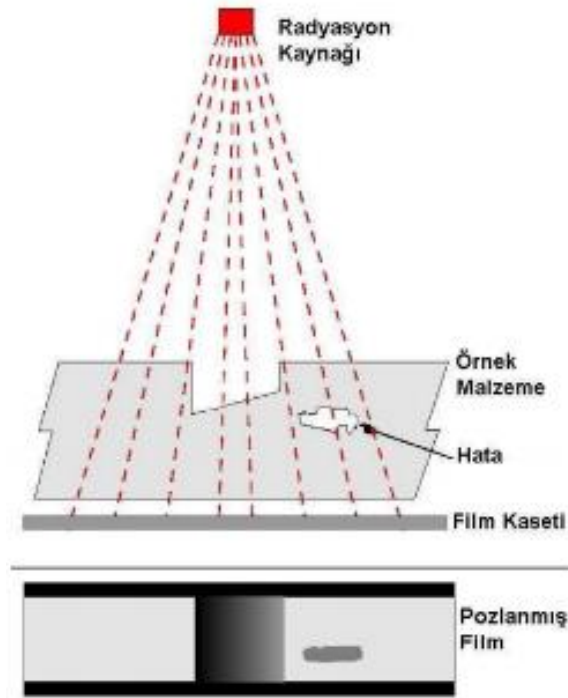


Şekil 6.5. Penetrant muayene uygulama sırası akış şeması [2].

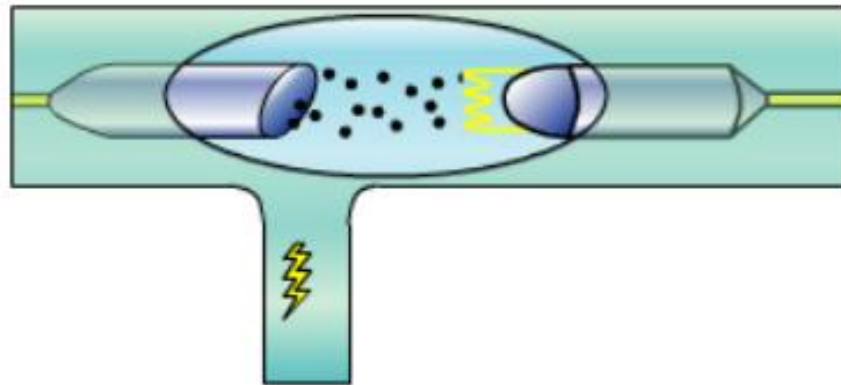
6.1.3. Radyografik (röntgen) ışınları ile muayene (RT)

Radyografik muayene yöntemi, hassas bir muayene yöntemi olması ve muayene sonuçlarının kalıcı olarak kaydedilebilme imkanı sunmasından dolayı sanayi uygulamalarında en yaygın olarak tercih edilen tahribatsız muayene yöntemlerinden birisidir. Muayene sırasında test parçasına, kaynağından çıkan radyasyon demeti (X veya gama ışınları) ile ışın yollanır. Radyasyon, malzeme içerisinden nüfuz ettikten sonra malzemenin özelliğine bağlı olarak belli oranda emilerek kayba uğrar ve sonrasında parçanın arka yüzeyine yerleştirilen filme ulaşarak filmi etkiler oluşturur. Süreksizlikler radyasyonu farklı zayıflatmaya uğratacaklarından, hataların ve süreksizliklerin olduğu bölgelerden geçen radyasyonun şiddeti ile bu hatalar neticesinde film üzerinde oluşacak kararmalar da farklı olacaktır. Film banyosu sonrası film üzerindeki karanlık ton farklılıkları, süreksizliklerin belirtisi olarak görünür hale gelir (Şekil 6.6.) [47].

Bu metod ferromagnetik ve paramagnetik metaller ile diğer tüm malzemelere uygulanabilir. X ışınları malzemelere zarar vermeden iç yapılarındaki hataları inceleme imkanı sağladığından, tahribatsız muayenede sıkça kullanılmaktadır. X ışınının oluşumunda kullanılan tüpün şematik görüntüsü Şekil 6.7.'de verilmiştir. X ya da gama ışınlarıyla, malzemelerdeki kalınlık değişimleri, yapısal değişiklikler ve hatalar ile malzeme içerisindeki süreksizlikler ve hataların tespiti mümkündür [47].



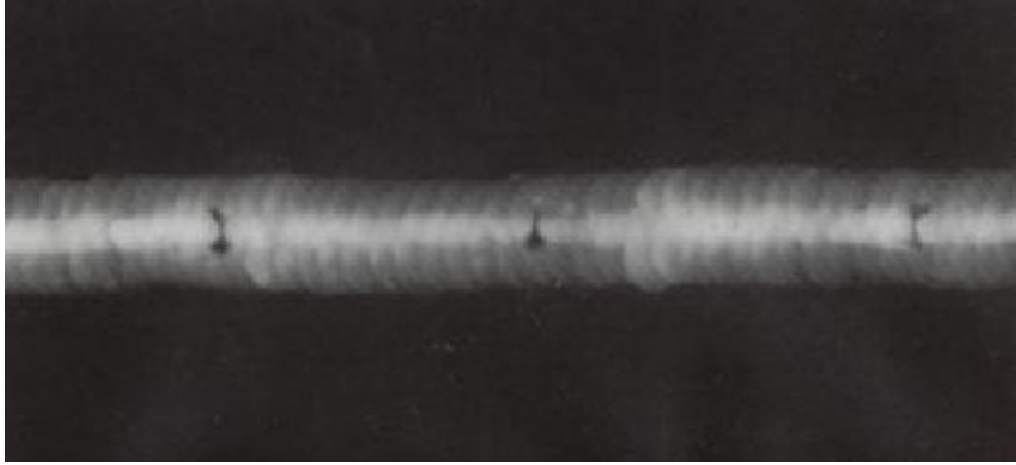
Şekil 6.6. Radyografik testin çalışma prensibi [47].



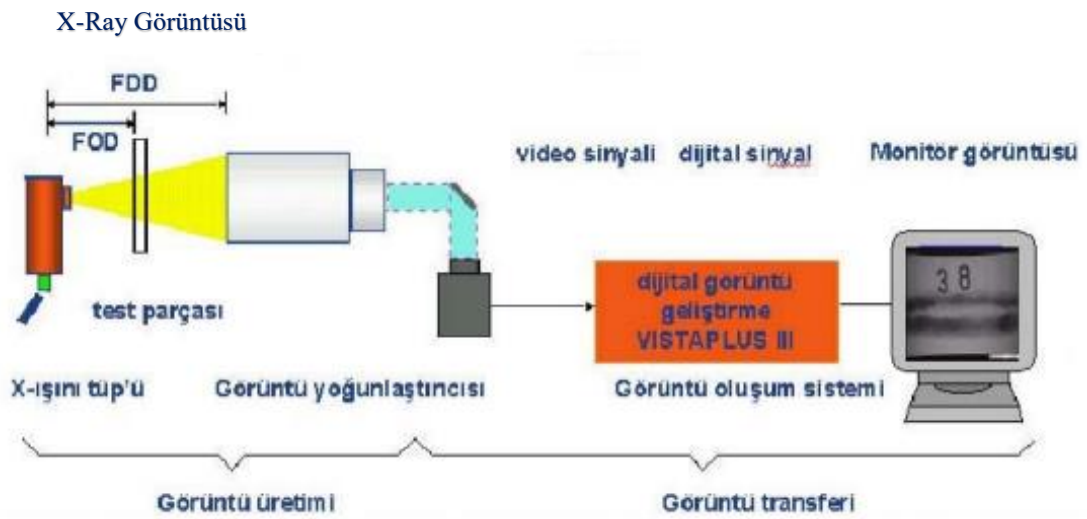
Şekil 6.7. Bir X ışını tüpünün şematik görüntüsü [47].

Radyasyon kaynağı olarak X yada gama ışın kaynağı, detektör olarak ta film kullanılmaktadır. Radyasyon kaynağının enerjisi, malzemenin enerjisini absorbe edeceğinden daha yüksek güçte seçilmelidir. Enerjinin geçebilme kabiliyetini belirleyen parametre ise ışığın dalga boyudur. Dalga boyu küçüldükçe nüfuz edebilme gücü de artar. Malzemeyi geçerek diğer tarafa ulaşan ışınları algılayan film genellikle ışık geçirmez zarf içerisine konularak test edilen malzemenin arka tarafına konulmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, zarfın ön yüzeyinin tüpten

çıkan ışınları kolaylıkla geçirme yeteneğine sahip malzemeden üretilmiş olmasıdır [4, 47, 51]. Şekil 6.8.'de radyografik film çıktısı görülmektedir.



Şekil 6.8. Radyografik film çıktısı [4].



Şekil 6.9. Radyoskopi yönteminin şematik görünümü [51].

Görüntüler malzeme içindeki boşluklar, süreksizlikler veya kalınlık/yoğunluk değişiklikleri nedeniyle oluşur. Malzemenin iç yapısının bu şekilde görüntülenmesi radyografik muayene olarak adlandırılır. Eğer malzemenin arka tarafına film yerine radyografik bir dedektör yerleştirilerek malzemeden geçen ışınlar algılanarak bir ekrana aktarılması durumunda Radyoskopi olarak adlandırılan teknik bir yöntem elde edilir. Radyoskopi yönteminin şematik görünümü Şekil 6.9.'da verilmiştir. Bu yöntem sayesinde metalik veya metalik olmayan tüm malzemelerde beklenen hacimsel ve

yüzey hatalarının tespiti anlık olarak yapıp ekranda görüntülenerek, kalıcı olarak kaydedilebilirler [47].

6.2. Tahribatlı Muayene

Malzemelerin süneklik-gevreklik, sertlik ve mukavemet gibi temel mekanik özellikleri iç yapılarına bağlıdır. Bu nedenle malzemelerin iç yapısı ve özellikleri iyi analiz edilmelidir. Bu özelliklerin belirlenmesi için çeşitli mekanik deneyler kullanılır [53].

Tahribatlı muayene; malzemelerin çekme, basma, darbe, eğilme vb. kalıcı şekil değişikliklerine karşı göstereceği direnci ve dayanımı belirlemek için uygulanan muayene metodudur. Daha hassas veya kaba uygulamalar için tahribatlı muayeneler makro ve mikro boyutta da uygulanabilir, bunlar [52];

- Çekme testi,
- Basma testi,
- Çentik darbe testi,
- Eğme testi,
- Sertlik testi,
- Makro/Mikro yapı testi.

Kaynaklı numunelerde tahribatlı deneyler aşağıdaki özellikleri belirlemek amacıyla yapılır [46];

- Kaynak dikişi, kaynak ısısından etkilenen bölge (ITAB) ve ana metal ile kaynak birleşim bölgelerinin mekanik özelliklerini saptamak,
- Malzemelerin kaynak edilebilirlik yeteneklerini belirlemek,
- Kaynak operatörünün yetenek düzeyini saptamak,
- Kaynak metodlarının veya prosesteki parametrelerin kaynak üzerine etkisini araştırmaktır.

Burada sadece çalışmamızla ilgili olan testler ana başlıklar altında detaylandırılmıştır.

6.2.1. Çekme testi

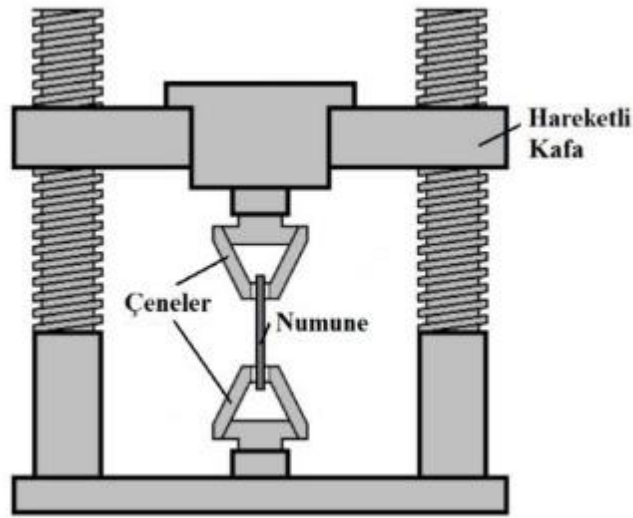
Çekme testi en bilinen tahribatlı malzeme muayene yöntemidir. Çekme testi, malzemelerin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılır. Bu yöntem ile ilgili standartlarda belirtilen boyutlardaki test çubuğuna devamlı artan bir şekilde kuvvet uygulanır. Çubuğa uygulanan kuvvet, akma mukavemeti sınırının geçilmesi ile birlikte kalıcı şekil değiştirme meydana getirir. Akma mukavemeti altındaki uzama kalıcı değildir, bu sınırın altında elastik şekil değişimi oluşur. Kalıcı uzamanın olduğu şekil değişimi ise plastik şekil değişimidir [52].

Malzemelerin iç yapısı ile mekanik özellikleri ve deformasyon şartları (sıcaklık, deformasyon hızı, sürtünme, değişken yükler vs.) plastik deformasyon yeteneklerini belirleyen etmenlerdir. Genel anlamda metalik malzemelerin plastik deformasyon özelliklerini etkileyen kriterler aşağıdaki gibidir [54];

- Malzemenin iç yapısı ve mekanik kriterleri,
- Deformasyon hızı,
- Değişken yükler,
- Sıcaklık,
- Sürtünme ve aşınma,
- Hidrostatik basınç,
- Kalıntı gerilmeler,
- Yapısal tasarım.

Malzemelerin durumu ve yapısı, kimyasal kompozisyonu ile geçmişte uygulanan termomekanik işlemlerin durumuna bağlıdır. Tane boyutu veya yönelmiş taneler ile oluşan mikroyapı sonucu elde edilen mekanik özelliklerdeki anizotropiye bağlı olarak plastik deformasyon özelliği etkilenir. Üretim aşamasında yerleşen malzeme içeriğinde bulunan metalik olmayan oksit, sülfür, silika veya alümina gibi kalıntılar (inklüzyonlar) ve empüriteler mekanik özellikleri etkileyerek plastik deformasyon yeteneklerini olumsuz yönde etkilerler [54].

Çekme deneyi yapılacak numunenin mekanik değerlerinin sağlıklı olarak alınabilmesi için; malzemeyi tam olarak temsil etmeli, imalat şeklinin (döküm, kaynak, sıcak dövme veya haddeleme, soğuk deformasyon vb.) bilinmesi, numunenin alınış şeklinin uygun olması ve numunenin parça üzerinde alındığı yerin bilinmesi gereklidir. Aksi durumda malzemeyi temsil etmeyen test numuneleri yanılmaya sebep olabilir, bu da yanlış değerlendirmelere sebebiyet verebilir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen kriterlerin test yapmadan önce mutlaka bilinmesi gereklidir [55].

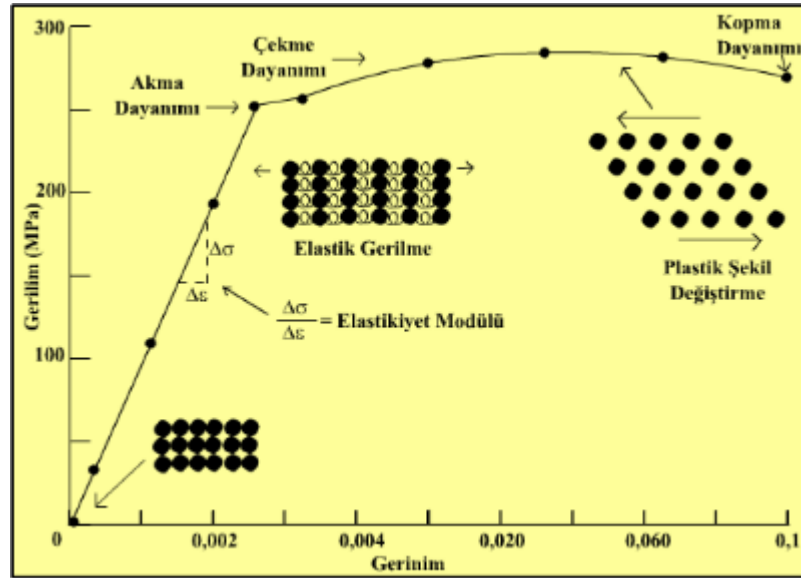


Şekil 6.10. Çekme testi düzeneği [4].

Çekme deneyi sonucunda, oluşan gerilme-genleme diyagramından malzemeye ait elastiklik modülü, elastiklik sınırı, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kesit daralması ile yüzde uzama, rezilyans ve tokluk gibi mekanik özellikler bulunabilir [55].

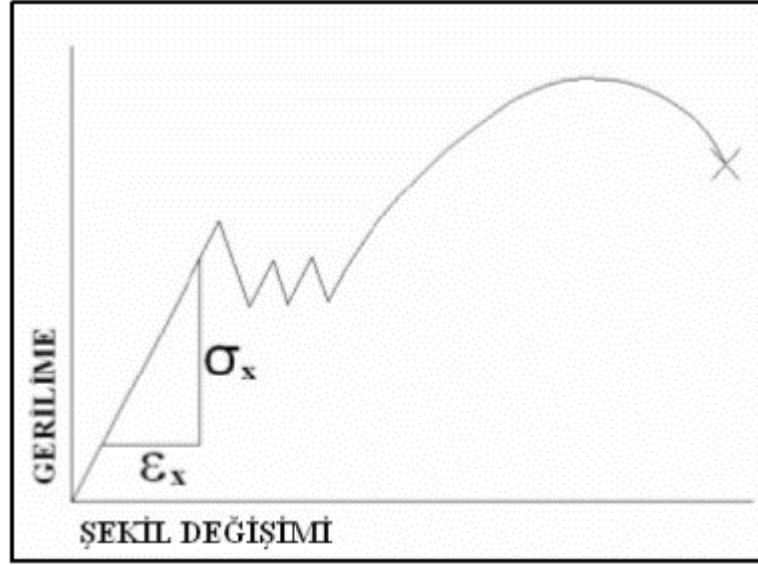
Malzemelere ait elastiklik modülü (E), çekme diyagramının elastik kısmını oluşturan eğrinin eğimine eşittir. Bu durumda $E = \sigma / \epsilon$ olan orandır. Şekil 6.12’de E değerinin tespiti grafik üzerinde gösterilmiştir. Elastiklik sınırı (σ_e), malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında plastik şekil değişiminin görülmediği veya yalnız elastik şekil değiştirmenin meydana geldiği en yüksek gerilme değerine eşit olduğu gerilmedir [55].

Akma mukavemeti (σ_a), uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşın, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünlük gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir. Belirgin akma göstermeyen numunelerin akma sınırı %0,2'lik plastik uzamaya denk gelir. Şekil 6.13.'te alt akma ve üst akma gösteren grafiğe ait akma noktalarının tespiti görülmektedir [55].

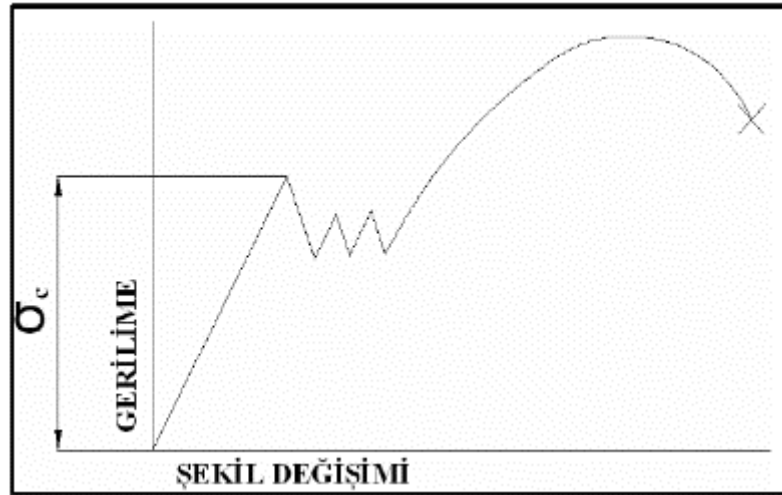


Şekil 6.11. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri [55].

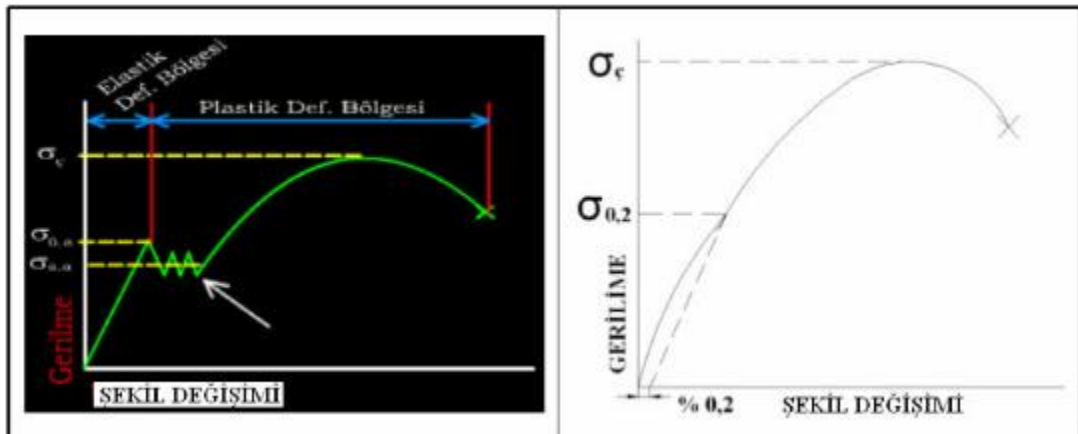
Çekme dayanımı (σ_c), bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilme değeri olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup, $\sigma = F_{maks}/A_0$ formülü ile bulunur. Burada F_{maks} malzemeye uygulanan en yüksek kuvveti, A_0 ise malzemenin ilk kesit alanını gösterir. Ayrıca malzemelerin çekme mukavemeti ile sertlik arasında bağıntı mevcuttur ve buna bağlı olarak yorulma dayanımı gibi faktörlerde de tahminde bulunulabilir [55].



Şekil 6.12. Elastisite modülünün tespiti [55].

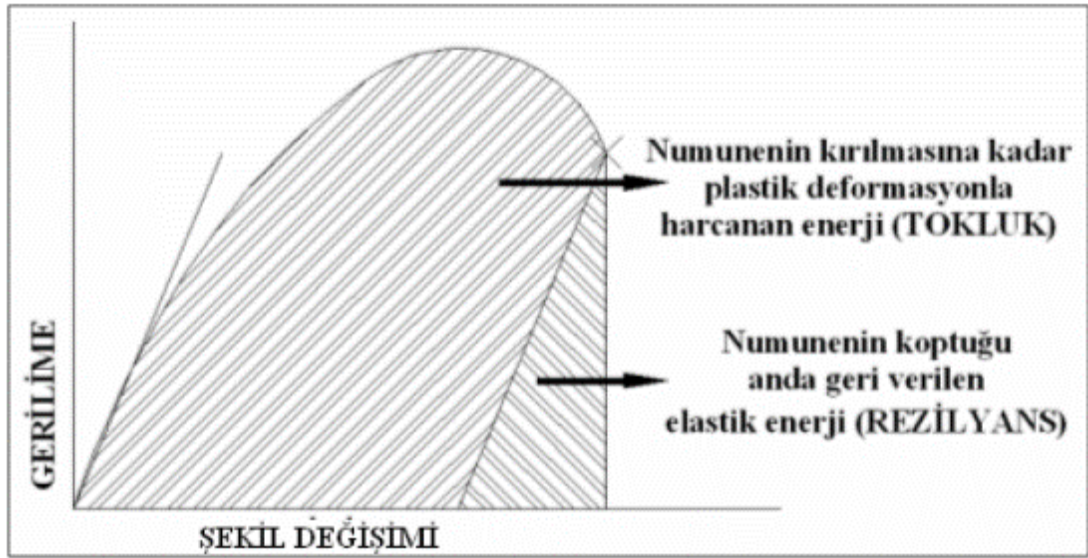


Şekil 6.13. Çekme diyagramında akma dayanımının gösterimi [55].



Şekil 6.14. Çekme diyagramında çekme gerilmesi noktasının gösterimi [55].

Kesit daralması ve yüzde uzama, numunenin kesit alanında meydana gelen en büyük yüzde daralma veya büzülme miktarıdır; yüzde uzama ise çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı olarak tanımlanır. Tokluk, numunenin kırılıncaya kadar depoladığı enerjiye denir. Genellikle gerilme-genleme eğrisinin altında kalan alandan hesaplama yapılır. Şekil 6.14'te çekme testinde rezilyans tespiti görülmektedir. Şekil 6.15.'te ise çekme testinde rezilyans ve tokluğun aynı grafikte hesaplama bölgeleri görülmektedir [55].



Şekil 6.15. Gerilme-genleme eğrisi altında şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi [55].

Rezilyans ise, numunenin yalnızca elastik şekil değişimi için harcanan enerji veya elastik şekil değişimi sırasında numunenin depoladığı enerji anlamına gelir. Bu enerji, gerilme-genleme eğrisinin elastik kısmının altında kalan alana eşittir ve malzeme kırıldığında bu enerji geri verilir [55].



Şekil 6.16. Çekme testi cihazı [4].

EN 895 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin tahribatlı testlerinden enine çekme testini kapsamaktadır. Bu standart, numune hazırlanması ve test sonuçlarının değerlendirilmesi konularında bilgi sağlamaktadır [4].

Çekme testinde numune kırılma yüzeylerine bakıldığında, numunelerin sünek veya gevrek kırıldığı tespit edilebilir. Sünek kırılma yüzeyleri malzeme biliminde koni-çanak yapısı tabiriyle, kopma şeklinde oyuklu veya çukur görünümlü, gevrek kırılma yüzeylerinde ise küt ve düz şekilde ve kristalin görünümlü kırılma gerçekleştiği görülür.

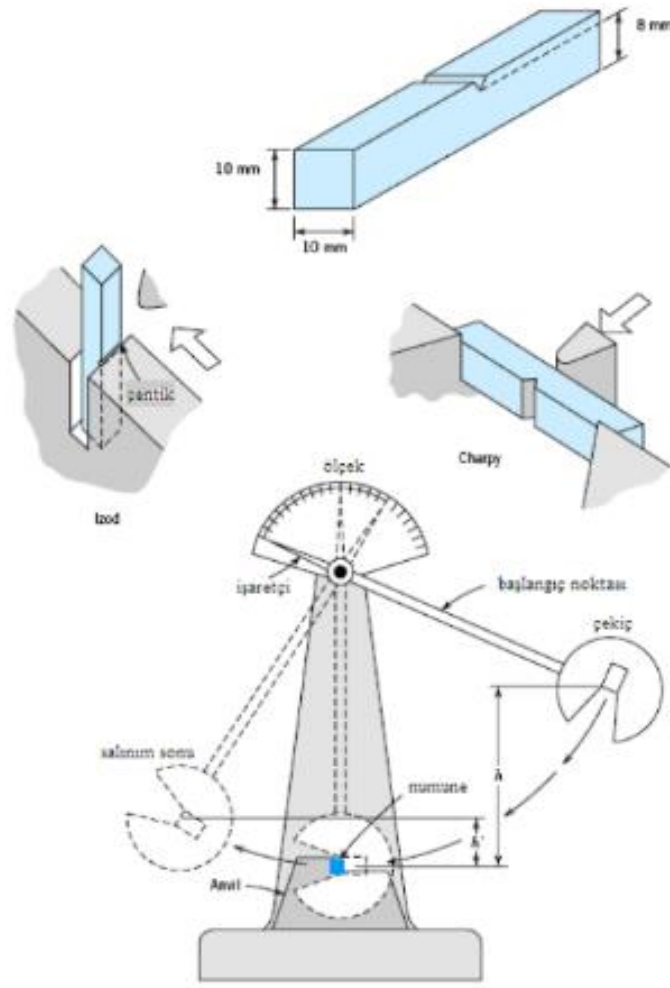
6.2.2. Çentik darbe testi

Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemel tespit edilecek bir gerilim birikiminin darbe esnasında, oluşturulan çentik tabanında suni olarak başlatılarak, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Gri dökme demir numunelerinde, malzemenin bünyesindeki grafitlerin yapısı sivri uçlu olması nedeniyle çentik etkisi yapacaklarından, ayrıca çentik açmaya gerek yoktur. Darbe deneyi, metallerin özellikle gevrek kırılmaya müsait şartlardaki mekanik özellikleri hakkında tam anlamıyla fikir tayin etmek amacıyla uygulanır [56].

Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilim meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilimin etkisi ile olur. Numunenin deforme olabilmesi için bu dik gerilimin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif kuvvetlerden fazla olması gerekir. Numune, plastik şekil değiştirmeye fırsat bulamadan bu durum meydana gelirse, buna gevrek kırılma diyoruz. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir. Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik şekil değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal gerilime ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilimi etki etmeye başlar. Kayma gerilimi, kritik kayma dayanımını aştığı an, elastik özellik sona erer ve plastik şekil değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik şekil değiştirme, daha sonra da kırılma meydana gelir. Buna ise sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştedir. Kayma kırılması denilen bu durum, sünek malzemelerde bulunan bir kırılma mekanizmasıdır [56].

Çentikli darbe testleri iki farklı şekilde uygulanmaktadır [56];

- Charpy darbe deneyi,
- Izod darbe deneyi.



Şekil 6.17. Charpy ve Izod deneylerinde kullanılan numuneler ve darbe testi düzeneği [56].

Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halindeki iki mesnede yaslanan numunenin çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile kırılması için gerekli enerjiyi elde etme işlemidir. Izod darbe deneyi ise, dikey ve konsol kiriş halindeki bir kavrama çenesine konulan numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjiyi tayin işlemidir [56].

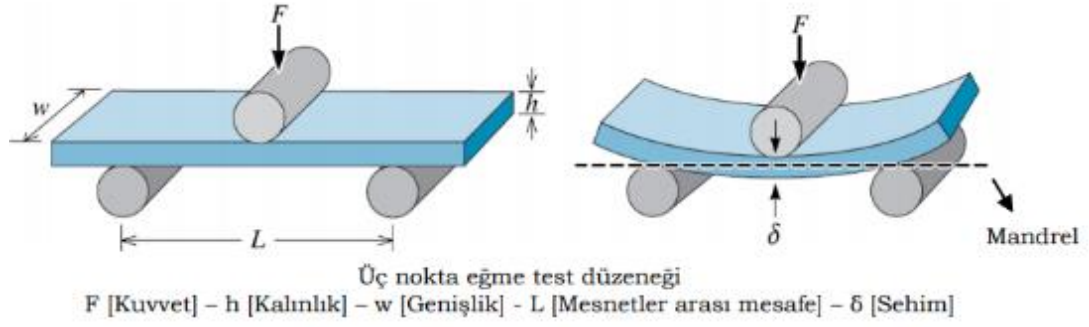
Şekil 6.17.'de görüleceği üzere, sarkacın numuneye temasında oluşan potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, test numunesinin kırılması için gerekli enerjiyi yani darbe tokluğunu verir [2].

Çeliklerin sıcaklığı azaldıkça darbe enerjileri de azalır. Çeliklerdeki karbon ve diğer alaşım elementleri oranlarının belirlenen bir sıcaklıkta darbe tokluğunu etkiledikleri bilinmekle birlikte sünek-gevrek geçiş sıcaklığını da etkilemektedirler. İnce taneli çelikler, kaba taneli çeliklerden daha iyi darbe tokluğuna sahiptir. Tane boyutu ile geçiş sıcaklığı doğru orantılıdır. Çelik mikroyapısı darbe tokluğunda da önemlidir. Mikroyapı kimyasal bileşim ve mekanik özelliklerden bağımsız olarak çeliğin tokluğuna etki edebilir. Temperlenmiş martenzit veya beyritik yapılar diğer mikroyapılardaki fazlara kıyasla en yüksek darbe tokluğu ve en düşük sünek-gevrek geçiş sıcaklığını sağladığı kanıtlanmış bir olgudur [57].

6.2.3. Eğme testi

Eğme deneyi malzemelere, malzemelerin mekanik dirençleri hakkında tasarım aşamasında fikir vermek ve malzemelerin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile uygulanır. Enine yük taşıyan kiriş gibi bağlantılar eğilmeye maruz kalırlar. Bu deneyin temel prensibi, deneyde kullanılacak malzemeyi basit kiriş modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Kirişin her bölgesinde eğilme momentleri oluşmaktadır. Literatürde belirtilen eğilme denklemlerinin geçerliliğinin olması için, malzemenin homojen yapıda veya Hooke kanunlarına uyması gereklidir [58].

Metalik malzemelerin eğme deneyi, malzemelerin şekil değiştirme özellikleri hakkında genellikle nitel bir bilgi edinme amacıyla yapılmaktadır. İmalat esnasında eğerek veya katlayarak form verilen malzemelerin şekil değiştirme kabiliyetlerinin tespitinde (örneğin: gemi sacları, endüstriyel kazanlar, konstrüksiyon kaynaklarının dikişlerinin şekil değiştirme kapasitesi, profil borularda kaynak dikişi ile esas malzeme arasındaki bağlantı durumlarında vs.) çoğu kez bu deneyden yararlanır. Nicel deneyler ise genelde gevrek malzemelerin davranışlarını tespit etmek için yapılmaktadır [58].

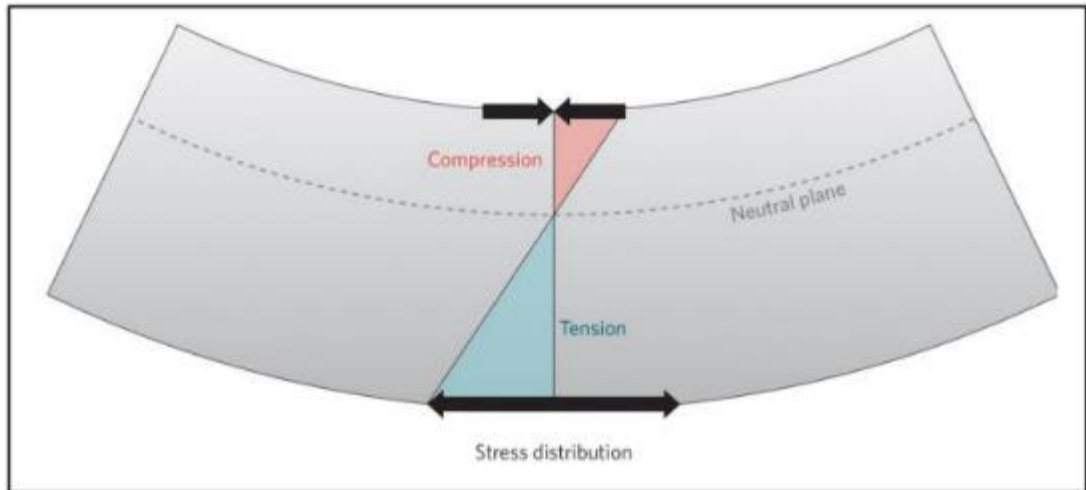


Şekil 6.18. 3 nokta eğme deneyi düzeneği [58].

Eğme deneyi sonucunda [58];

- Eğme momenti [Me],
- Eğilme gerilmesi [σ_e],
- Elastisite modülü [Ee],
- Sehim miktarı [δ] değerleri hesaplanabilmektedir.

Sehim, eğilme kuvveti altındaki bir malzemenin eğilme göstermeden önceki çubuk eksenini durumu ile elastik eğri durumu arasındaki deformasyon oranıdır. Yani bu durum malzemelerde direngenlik olarak tanımlanır. Belirtilen kuvvet altında yapı elemanının yaptığı yer değiştirme sehim olarak tanımlanır [58].



Şekil 6.19. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı [59].

Test numunesine bir kuvvet uygulandığında, numunede bükümün olduğu iç kesitte yüzey düzleminde basma mukavemeti, bükümün dış kesitinde yüzey düzleminde çekme mukavemeti meydana geliyorsa numune eğilme dinamiğindedir. Eğilme durumundaki numunelerin kesitinde, Şekil 6.19.'daki gibi, iç yüzeye yakın bölgelerde basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgelerde ise çekme gerilmeleri oluşumları görülmektedir. Bu durum malzemenin mekanik özellikleri etkisinde deformasyon hızına bağlı olarak 180° bükülünceye kadar devam edecektir [59]. Çekme cihazları aynı zamanda eğme testi de yapabilmektedirler. Bunun için cihazın çekme çeneleri demonte edilip yerine istenen eğme testi türüne göre eğme testi aparatlarının takılması yeterlidir [4].

Tablo 6.1. Sertlik testi türleri ve uygulama alanları [4].

Sertlik Deneyi Türü	Baskı Ucu	Yük (kg)	Uygulama
Knoop	Elmas Piramit	1-2000	İnce Sertlik
Vickers	Elmas Piramit	1-2000	İnce Sertlik
Rockwell C	Elmas Konik	150	Kalın ve Sert Metaller
Rockwell B	Çelik Bilya	100	Sertliği Yüksek Olmayan Çelik ve Demir Dışı Metaller
Rockwell T	Çelik Bilya	15,30,45	Çok İnce ve Yumuşak Metaller
Rockwell N	Elmas Konik	15,30,45	Sert ve İnce Metaller
Brinell	Çelik Bilya	62,5-3000	Sertliği 40 HRC'ye Kadar Olan Çelikler

6.2.4. Sertlik testi

Sertlik, malzemelerin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Malzemelerin elastiklik özellik, süneklik, gevreklik, tokluk ve mukavemet gibi önemli mekanik kriterlerim yanında diğer önemli kriteri de sertlik özelliğidir. Belirli şartlar altında yüzeyde oluşturulan kalıcı izin çeşidine ve büyüklüğüne göre tayin edilir. Bilimsel olarak malzemenin dislokasyon hareketine veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarakta tanımlanabilir. Sertlik bir anlamda malzemenin plastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlandığından, çekme dayanımı ile bağıntısı vardır [60].

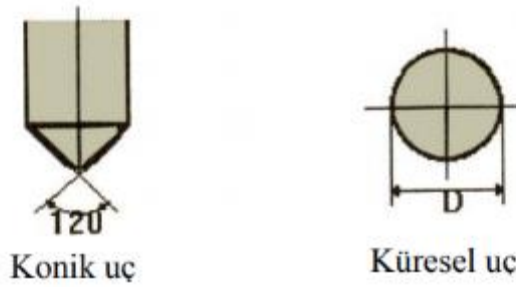
Çelik ve demir dışı metallerde en sık kullanılan sertlik ölçüm metodları ve uygulama alanları Tablo 6.1.'de verilmiştir.

Bütün demir dışı metallerde ve çelikte, sertlikler soğuk deformasyon ve ısı işlemler sonucu nicel olarak değişmektedir. Sertlik değerlerinden uygulanan ısı işlem ve malzemenin mikroyapısında bulunan fazların özellikleri hakkında yorumlar yapılabilir. Sertlik testleri bu sebeple yaygın olarak kullanılır ve özel bir numune hazırlanmasına gerek duyulmadan malzemeler üzerinde uygulanabilir [60].



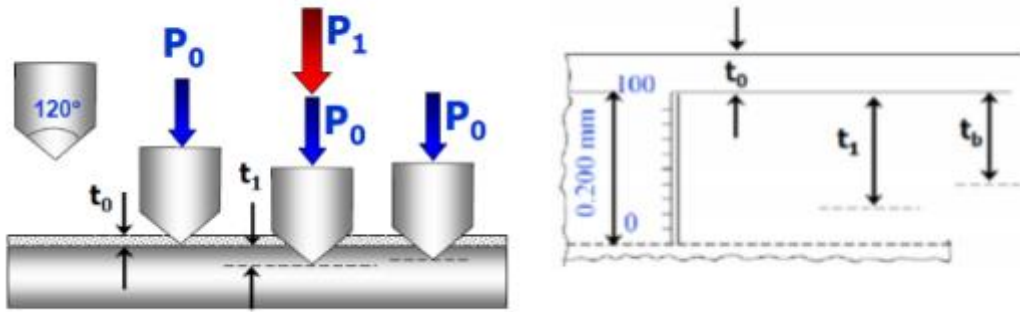
Şekil 6.20. Sabit ve portatif sertlik ölçüm cihazları [61, 62].

Rockwell sertlik testinde, koni ya da küre biçiminde bir ucun belli bir yük altında malzeme üzerinde oluşturduğu izin derinliğinin ölçümü sonucu elde edilen sertlik değeridir. Rockwell sertlik ölçüm metodunda batıcı uç olarak tepe açısı 120° olan basık elmas, konik ya da küresel çaplı çelik bilyalar kullanılır. Kullanılan batıcı ucun türü, yöntemin simgesinde belirtilir. Elmas uç kullanıldığında yöntem HRC ve HRA olarak ifade edilir. Çelik bilyada ise HRB ve HRF ifadeleri kullanılır. Bunlar arasındaki fark test sırasında uygulanan yük değerleridir. En çok kullanılan Rockwell sertlik skalaları B ve C ölçekleridir [63].



Şekil 6.21. Malzeme cinsine göre kullanılan Rockwell uç çeşitleri [63].

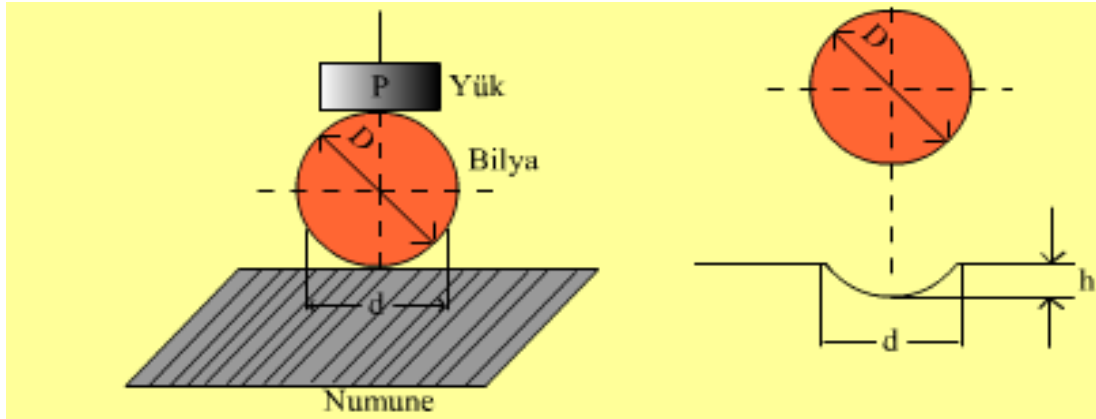
Rockwell sertlik ölçümünde batıcı uç, malzeme üzerine 10 kg (100 N) ön bir yüklemeye (P_0) ile başlar, sonrasında da batıcı uca ana yük (P_1) uygulanarak test sonlanır ve elde edilen derinlik ölçülür. Oluşan kalıcı izdeki derinlik artışı tespit edilerek göstergeden Rockwell sertlik skalası okunur. Standart olarak ana yük Rockwell B (HRB) için 100 kg, Rockwell C (HRC) için 150 kg'dır. Batıcı ucun ön yük ve ana yük uygulaması şematik olarak Şekil 6.22.'de gösterilmiştir [64].



Şekil 6.22. Rockwell sertlik testinin şematik gösterimi [64].

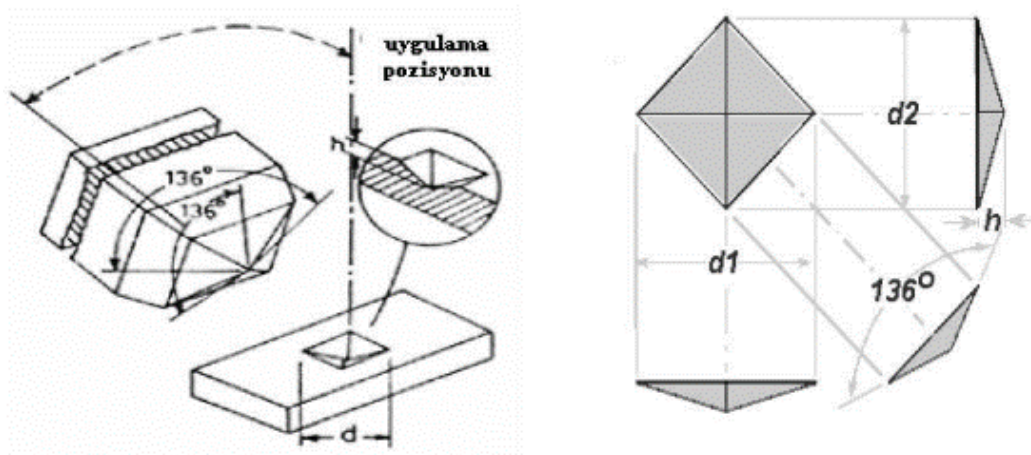
Brinell sertlik testinde sert çelik veya tungsten karbürden yapılan bir bilya, belirli bir yük ile malzemenin yüzeyine batırılır ve malzemenin yüzeyinde meydana gelen izin çapının ölçüm metodu ile sertlik tayini yapılır. Uygulanan yük, malzemenin yüzeyinde oluşan izin küresel yüzey alanına bölünerek, Brinell sertlik değeri hesaplanır. Standart Brinell deneyinde kullanılan yükler 500, 750, 1500 veya 3000 kg'dır. Ancak en doğru

sonuç 3000 kg yük ile 10 saniye uygulama metoduyla tespit edilir. Yük malzemeye yavaş yavaş artacak şekilde uygulanmalı, dinamik yüklemeler önlenmelidir. Genel olarak bir malzemenin Brinell sertlik değeri yük ve bilya çapına bağlı olarak delişir. Ancak değişen şartlara karşın aynı Brinell sertlik değerinin elde edilebilmesi için, yüzeyde oluşturulan kalıcı izlerin geometriksel benzerliği sağlanmış olmalıdır [60].



Şekil 6.23. Brinell sertlik testinin şematik gösterimi [2].

Vickers sertlik ölçme metodu en hassas sertlik ölçme yöntemidir. Test, daha uzun zaman almasına rağmen, özellikle araştırma ve inceleme amacıyla mikro sertlikleri ölçmeye çok elverişlidir. Bu yöntemde kullanılan batıcı uç, kare tabanlı bir piramit şeklinde olup elmas yapıları malzemedan imal edilmiştir. Piramit ucun tepe açısı 136 derecedir (Şekil 6.24.). Belirli bir yük ile malzeme yüzeyine batırılan uç şekilde de görüleceği üzere bir eşkenar dörtgen oluşturur [60].



Şekil 6.24. Vickers sertlik testinde kullanılan ucun şematik gösterimi [60].

Malzemede meydana gelen eşkenar dörtgen iz üzerinde d köşegeninin uzunluğu, d_1 ve d_2 köşegen uzunluklarının ortalaması olarak hesaplanır. Uygulanan yük ve hesaplanan köşegen uzunluğu aşağıdaki denklemde yerine konarak (HV) Vickers sertlik tayini yapılır [60]:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2} \quad (6.1)$$

Vickers sertlik testinde doğru değerlerin alınabilmesi, en geniş ölçme genliğine sahip olması ve tüm metal yüzeyler için tek bir uç kullanılması gibi diğer ölçüm metodlarına göre üstünlüğü vardır. İlaveten değişken yükler altında sert ve yumuşak malzemelere ait sertlik ölçümleri için de kullanılabilirler. Vickers sertlik testinin dezavantajı ise izin büyüklüğünün optik olarak ölçmeye ihtiyacı olmasıdır. Bu yöntemde ölçme cihazı, sertlik muayene cihazı ve mikroskop cihazının karışımı olan bir alet gibi olmasıdır. Dolayısıyla izin optik olarak görülüp değerlendirilebilmesi için test yüzeylerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış olması gereklidir [60].

6.2.5. Makro/mikro yapı testi

Makro ve mikro yapı testleri; kaynaklı numunelerde pasolara arası dizilimler, ergime bölgesi, tane yapıları ve bu yapıların geçiş bölgelerindeki durumlarının incelenebilmesi amacıyla uygulanır. ISO 17639 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin makroskobik ve mikroskobik testlerini kapsamaktadır [4].

Kaynaklı numunelerde makroyapı, uygulanan kaynak metoduna, uygulanan kaynak parametrelerine ve ana malzemeye bağlı olarak değişim gösterir. Kaynaklı imalatta kalite kontrol testlerinin en temel ögesi metalografidir. Kaynaklı numune makroyapısı; kaynak dikişi, ısı etkisi altındaki bölge (ITAB) ve ana malzemeler olmak üzere üç farklı bölgelerden oluşur. Kaynak dikişi ve ısıdan etkilenmiş bölgede, kaynak bileşiminde, sertlikte, mikroyapıda, tane boyutu ve tane yönlenmelerinde farklılıklar görülür. Bu nedenle bu farklılıkları mikroyapı incelemesiyle tayin etmek gerekir [65].

Kaynaklı numunelerde mikroyapı muayenesi ise, malzemelerin iç yapısının incelenmesi amacıyla yapılır. Kaynaklı metalik malzemelerin iç yapısı, malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri için büyük ölçüde önem arz etmekte ve etkilemektedir. Mikroyapı incelemesi için numunelerin hazırlanması dört aşamada gerçekleştirilir. Bu aşamalar; numune alma, numune hazırlanması, dağlama ve numune incelemesidir.

Numune hazırlama ve dağlama işlemlerinden sonra malzeme iç yapısı optik mikroskopta gerekli büyütme kullanılarak incelenir. Yeni nesil bilgisayar entegreli optik mikroskopları daha verimli kullanabilmek için çeşitli yazılımlar da mevcuttur [65].

Mikroskobik incelemede kullanılan optik mikroskobun yanı sıra, yeni teknoloji taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bir taramalı elektron mikroskobunda görüntü oluşumunda temel ilke; gönderilen elektron demetinin incelenen numunenin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin neticesinde oluşan sinyallerin toplanarak değerlendirilmesine dayanır. Ayrıca bu etkileşme prensipleri doğrultusunda ortaya çıkan X ışınlarının her atoma özel ortaya çıkan karakteristikleri, incelenen malzemelerin element çeşidi tayininin nicel ve nitel olarak tespit edilmesine de yardımcı olur [4].

Bu çalışmada makro-mikro yapı testi ile bu mikroyapılarla ilişkili olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi yapılacaktır.

BÖLÜM 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Deney Parçalarının Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Yapılan çalışmada ana malzemelerden biri olarak kullanılan Armox 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 7.1.'de verilmiştir [66].

Tablo 7.1. Armox 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu [66].

C max. %	Si max. %	Mn max. %	P max. %	S max. %	Cr max. %	Ni max. %	Mo max. %	B max. %
0,32	0,4	1,2	0,01	0,003	1,01	1,81	0,7	0,005

Armox 500T çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.2.'de verilmiştir [66].

Tablo 7.2. Armox 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri [66].

Akma Gerilmesi R _{p0,2} min. MPa	Çekme Gerilmesi R _m , MPa	Uzama A ₅ % min.	Uzama A ₅₀ % min.	Sertlik (HBW)	Darbe Testi Charpy-V (-40 °C) J, min.
1250	1450 - 1750	8	10	480 - 540	32

Armox 500T zırh çeliğine kaynatılan SAE 4140, C45 ve S355J2 çeliklerinin kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri, Bölüm 3. İslah çelikleri ve Bölüm 4. Yapı çelikleri kısmında detaylı olarak verilmiştir. Çalışmamızda, sertliği 80-81 HRB S355J2 kalitesinde yapı çeliği ile SAE 4140 ve DIN C45 ıslah çelikleri kullanılmıştır. Bu çelikler (SAE 4140, C45), tokluğu artırmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek amaçlı ıslah ısıl işlemi yapılmış olarak kullanılmıştır. İslah işlemi sonrası sertlikleri kontrol edildiğinde sırasıyla; 42-43 HRC ve 270-278 HBW sertlik değerlerinde oldukları görülmüştür. Armox 500T zırh çeliği sertliği ise 485-495 HBW (48-49 HRC) olarak ölçülmüştür.

Gazaltı kaynak prosesinde kullanılan östenitik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu Tablo 7.3.'te; mekanik özellikler ise Tablo 7.4.'te verilmiştir [67].

Tablo 7.3. Östenitik kaynak dolgu metaline ait kimyasal kompozisyon [67].

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,08	0,9	7,0	19,0	9,0

Tablo 7.4. Östenitik kaynak dolgu metaline ait mekanik özellikler [67].

Akma Gerilmesi $R_{p0,2}$ MPa	Çekme Gerilmesi R_m MPa	Uzama % (min.)	Darbe Testi (+20 °C), J (min.)
400	610	36	110

Kaynak prosesinde, hem kaynaklanacak malzemeler hemde dolgu metali için uygun olan %50₂, %5CO₂ ve %90Ar ihtiva eden gazaltı kaynak proselerinde en çok kullanılan karışım gazı kullanılmıştır.

7.2. Kaynaklı Birleştirme

Yapılan bu çalışmada 12x150x350 ebatlarındaki Armox 500T zırh çeliği, SAE 4140, C45 ıslah çelikleri ve S355J2 yapı çeliği plakalarına 'X' tipi kaynak ağzı açılarak alın altına birleştirme kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak öncesi kaynak ağzlarına tel fırça ile mekanik temizleme işlemi yapılmıştır. İmalatta plakalar, Magmaweld RS 500 MW kaynak makinasında gazaltı gaz kaynak yöntemiyle kaynatılmıştır. Kaynak işlemi, koruyucu karışım gaz altında gaz basıncı sabit kalmak suretiyle birbirine yakın amper ve parametrelerde yapılmıştır. Kaynak sonrası test plakalarında oluşacak ısıl çarpılmaları önlemek ve krater çatlak hatalarının hurda bölümünde kalmasını sağlamak için başlangıç ve bitiş noktalarına Şekil 7.1.'de görüleceği üzere başlıklar kaynatılmıştır. Parçaların alt kısmı tek paso, üst kısmı iki paso kaynak yapılmak üzere toplamda üç paso kaynak yapılmış, kaynak öncesi plakalarda seramik altlık kullanılmıştır.

Zırh sacı-SAE 4140 kaynaklı parçası T1, Zırh sacı-C45 kaynaklı parçası T2, Zırh sacı-St52 kaynaklı parçası ise T3 nolu test numuneleri olarak adlandırılmıştır.

7.2.1. Kaynak parametreleri

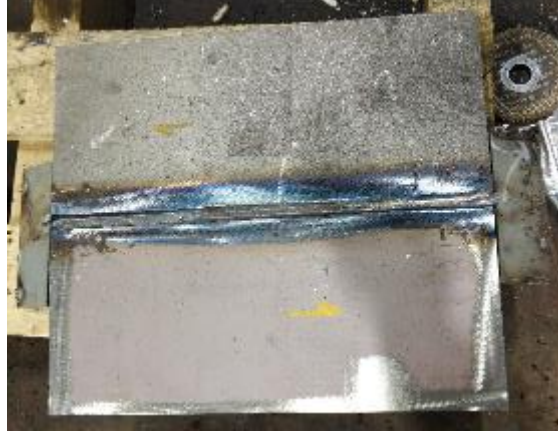
Test plakalarına uygulanan kaynak parametreleri Tablo 7.5.'te verilmiş, koruyucu gaz debisi 12,5 lt/dk olarak ayarlanmıştır. Kaynak parametreleri belirlenirken yapılan matematiksel programlama, zırh çeliklerinin kaynağında istenen düşük ısı girdisi göz önünde bulundurulduğunda, düşük akım ve voltaj değerleri ile sağlanabilmektedir.

Tablo 7.5. Test parçalarına uygulanan kaynak parametreleri.

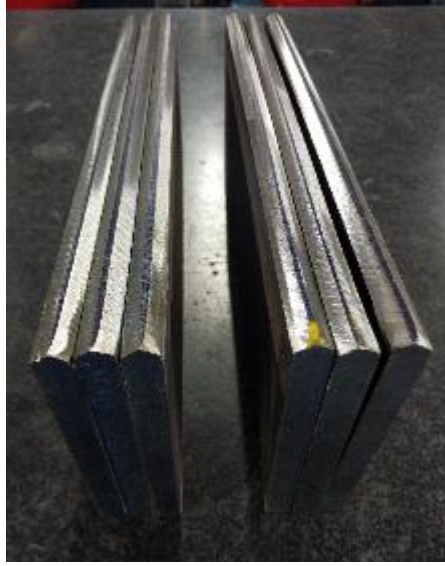
Test Numunesi	Amper A	Volt V	Gaz Debisi lt/dk	Tel Hızı m/dk	Kaynak İlerleme Hızı mm/dk	Isı Girdisi kJ/mm		Gaz Karışım Oranı
						1. Paso	2. Paso	
T1	250	27	12,5	12,3	308	1,05	%90 Argon, %5 CO ₂ , %5 O ₂	
					210	1,54		
					231	1,40		
T2	255	27	12,5	12,3	298,4	1,10	%90 Argon, %5 CO ₂ , %5 O ₂	
					243,8	1,35		
					220,1	1,50		
T3	245	29	12,5	12,3	255,3	1,33	%90 Argon, %5 CO ₂ , %5 O ₂	
					172,7	1,97		
					199,8	1,70		



Şekil 7.1. Seramik altlık ile kaynak hazırlığı yapılmış test numunesi ve kaynatılan başlıklar.



Şekil 7.2. Kaynak öncesi hazırlanmış numune parça.



Şekil 7.3. Numunelerde X kaynak ağızı görüntüsü.

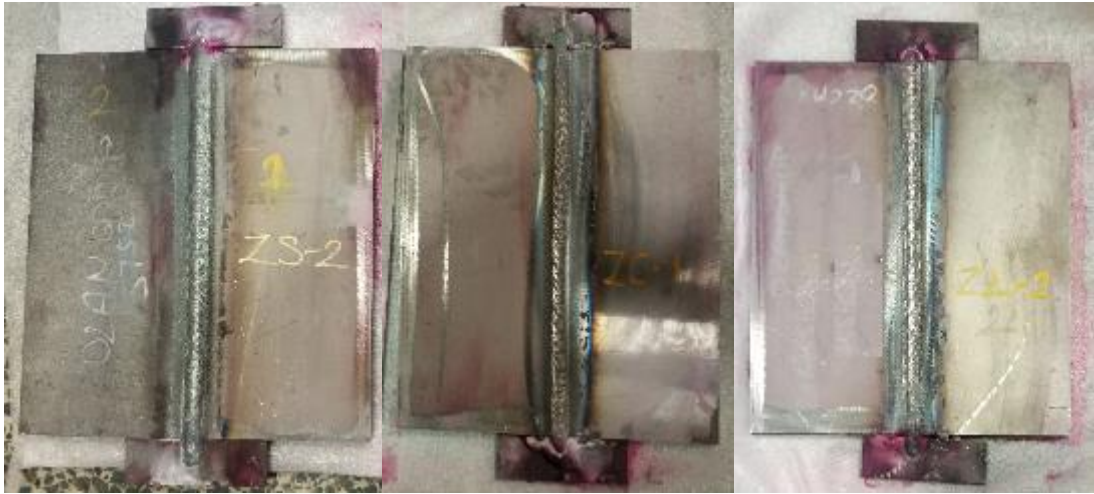
Kaynak öncesi hazırlık yapılmış numune Şekil 7.1.'de gösterilmiştir.

Kaynak öncesi numunelerdeki kaynak ağızı sıcaklık değeri ortalama olarak oda sıcaklığı olan 25 °C olarak ölçülmüştür. Kaynak sonrası ise standartlarda belirtildiği üzere zırh çeliklerinin özellikleri açısından kaynak dikişinin 75 mm uzağından çift nokta lazer ısı ölçer ile sıcaklıklar kontrol edilmiş, tüm parçalarda kaynak sonrası ölçülen maksimum sıcaklık ölçüm değeri 150 °C olduğu görülmüştür (Şekil 7.4.) [29].



Şekil 7.4. Kaynak işleminden hemen sonra yapılan sıcaklık ölçümleri.

Kaynak işlemi tamamlanmış test parçaları, mekanik testlerdeki verilere olumsuz etkilerini önlemek amacıyla, muhtemel kaynak hatalarının tespiti için tahribatsız muayene edilmiştir.



Şekil 7.5. Kaynaklı test parçaları.

7.3. Tahribatsız Muayeneler

Test parçalarına TS EN ISO 17636-1, TS EN ISO 3452-1, TS EN ISO 17637 standartlarına göre görsel, penetrant ve radyografik muayene işlemleri uygulanmıştır.

7.3.1. Görsel muayene

Kaynaklı test numunelerine TS EN ISO 17637 standardı isterlerine göre görsel muayene (kep yüksekliği, yanma olukları (undercut), kaynak dikişinin şekli, paso salınımları vs.) işlemi yapılmıştır.



Şekil 7.6. Test parçası kaynak kep ölçümü.

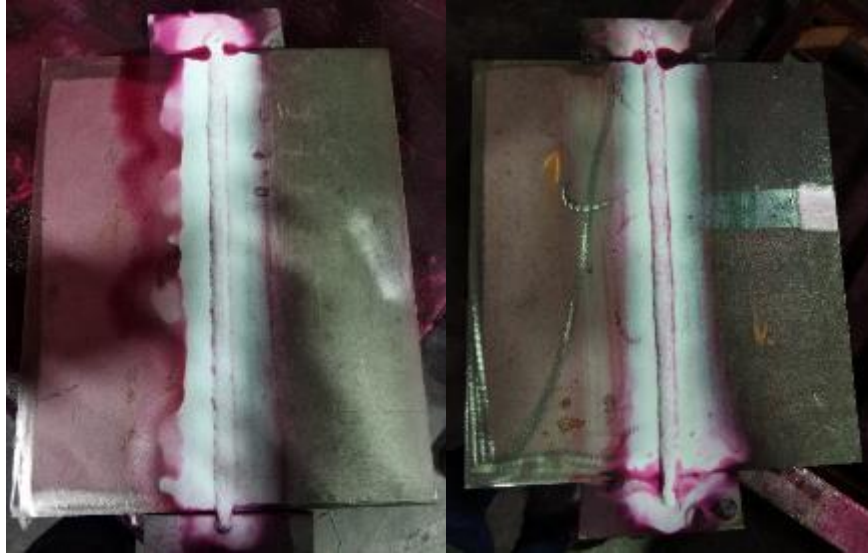
7.3.2. Penetrant muayenesi

Yüzeysel kaynak muayenesinde, kaynak prosesinde kullanılan dolgu metali östenitik tel olduğu için manyetiklenmeye müsait olmayan yapısı nedeniyle penetrant yöntemi tercih edilmiştir. EN 3452-1 standardına uygun olarak tip II metod C yöntemine göre test parçaları muayene edilmiştir.

Test parçalarına ilk iki paso kaynaktan sonra, spiral zımpara taşı ile kök temizliği yapılmıştır. Temizlikten sonra ilk olarak kök pasolar kısmına, sonrasında üçüncü paso kaynak yüzeylerine ve ilk paso uygulandığı yüzeydeki kaynaklara penetrant testi yapılmıştır.



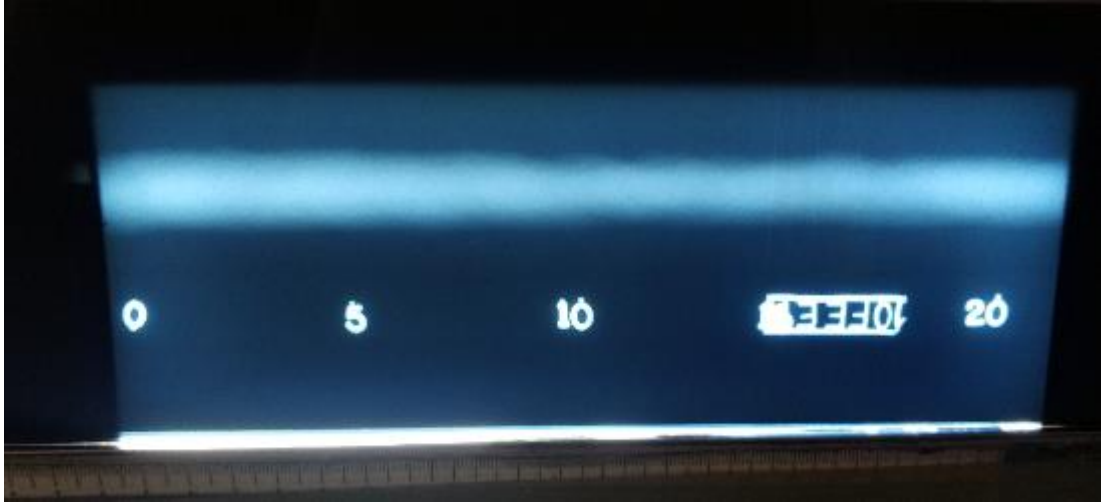
Şekil 7.7. Uygulama için kullanılan penetrant sıvısı, temizleyici ve geliştirici.



Şekil 7.8. Test parçaları penetrant muayenesi görüntüsü.

7.3.3. Radyografik muayene

Test parçaları TS EN ISO 17636-1 standardına uygun olarak radyografik muayene edilmiştir. Hacimsel kaynak muayene yöntemlerinden olan radyografik kaynak muayenesi X-Ray metoduyla yapılmıştır. Test parçalarının radyografik muayene görüntüleri Şekil 7.9., Şekil 7.10. ve Şekil 7.11.'de verilmiştir.



Şekil 7.9. T1 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.



Şekil 7.10. T2 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.

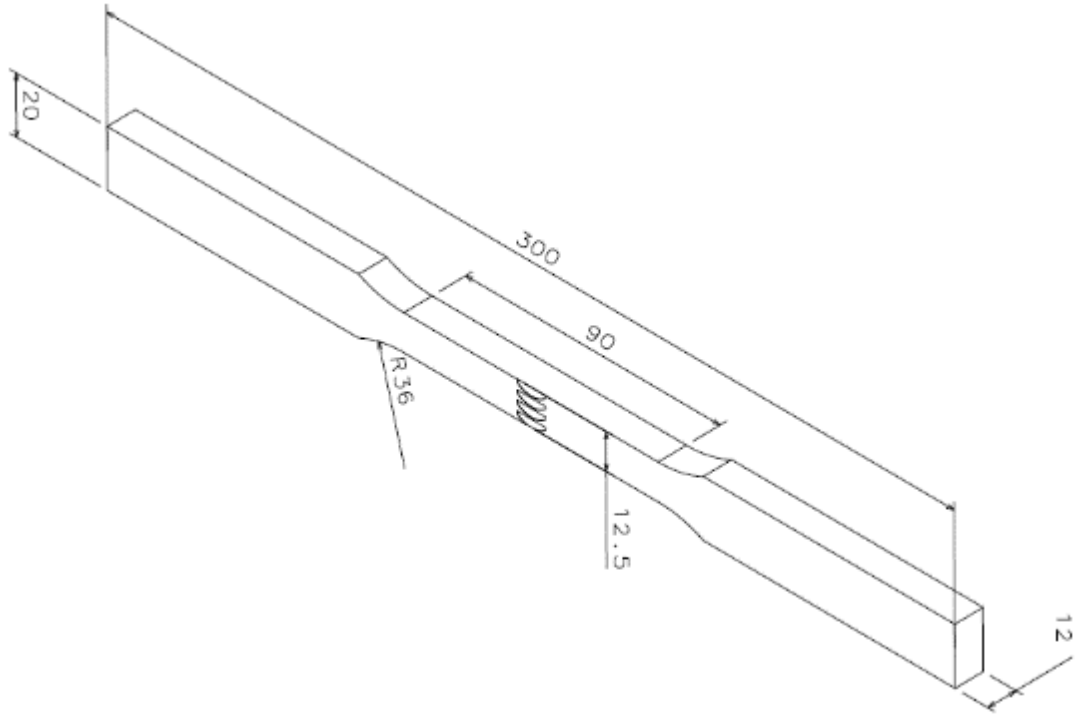


Şekil 7.11. T3 nolu test numunesinin radyografi görüntüsü.

7.4. Tahribatlı Muayeneler

7.4.1. Çekme testi

Çekme testleri için T1, T2 ve T3 test numunelerinden, 2'şer adet yapılmak üzere toplam 6 adet çekme testi numuneleri çıkarılmıştır. Bu numuneler TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak Şekil 7.12.'de görüldüğü gibi hazırlanmıştır. Standartta belirtildiği üzere numuneler yüksek ısı olmayan talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmış ve kaynak kep fazlalığı da frezelenmiştir. Testler laboratuvar koşullarında yapılmış olup (23 ± 2 °C), Şekil 7.13.'te görülen 30 tonluk Dartec marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

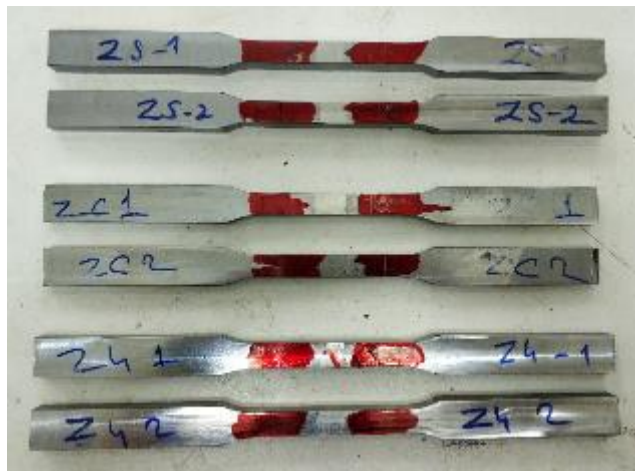


Şekil 7.12. Çekme testi numune ölçüleri.



Şekil 7.13. Çekme testi cihazı.

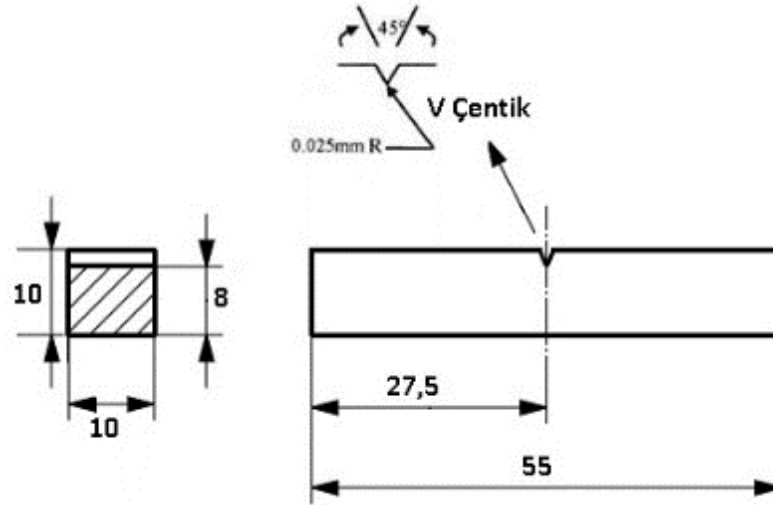
Çekme testi numuneleri Şekil 7.14.'te verilmiştir.



Şekil 7.14. Çekme testi numuneleri.

7.4.2. Çentik darbe testi

T1, T2 ve T3 nolu kaynaklı test numunelerinden; kaynak ergime hattı ve ısı tesiri altındaki bölgelerden 3'er adet numuneler çıkarılmıştır. Isı tesiri bölgesindeki numuneler zırh sacı tarafında, ergime çizgisinin 1 mm ötesinden, ergime çizgisinin 3 mm ötesinden ve ergime çizgisinin 5 mm ötesinden; zırh sacına kaynaklı diğer malzeme tarafından ise ITAB bölgesinden olmak suretiyle test plakalarından 15 adet, toplamda ise 45 adet numune çıkarılmıştır. V-Çentik darbe testi numuneleri Şekil 7.15.'teki gibi standartlara uygun olarak ve yüksek ısı görmeden hazırlanmış, testler için 300 J'ye kadar kapasitesi olan Losenhausenwerk marka çentik darbe testi cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.17.). Kırma testleri; ergime hattı ile zırh sacı ve zırh sacına kaynaklı diğer ana malzemelerin ısı etkisi altındaki bölgelerinden çıkarılan numuneler için zırh çelikleri ile ilgili standartlarda belirtildiği üzere tüm numuneler için -40 °C sıcaklıkta yapılmıştır.



Şekil 7.15. Çentik darbe testi numune ölçüleri.

Çentik darbe testi numuneleri Şekil 7.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.16. Çentik darbe testi numuneleri.



Şekil 7.17. Çentik darbe testi cihazı.

7.4.3. Eğme testi

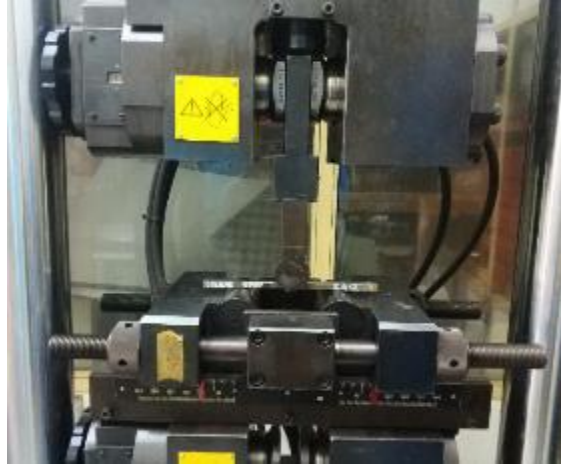
Eğme testi numuneleri, EN ISO 5173 standardına uygun olarak hazırlanmış olup, her test parçasından 2'şer adet numune çıkarılmıştır. Şekil 7.18.'de gösterilen eğme testi

numuneleri, kaynak yükseklikleri malzeme kalınlığı ile aynı olacak şekilde ısı etkisi altında olmadan frezelenmiştir. Test yöntemi olarak numunelere yan eğme (kök eğme) yöntemi ile eğme testi yapılmıştır.



Şekil 7.18. Plakalardan çıkarılan eğme testi numuneleri.

Testler, Şekil 7.19.'da görülen 300 kN kapasiteli Dartec marka çekme testi cihazında, üç nokta eğme aparatları kullanılarak, mesnetler arası mesafe 75 mm olacak şekilde laboratuvar ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir.



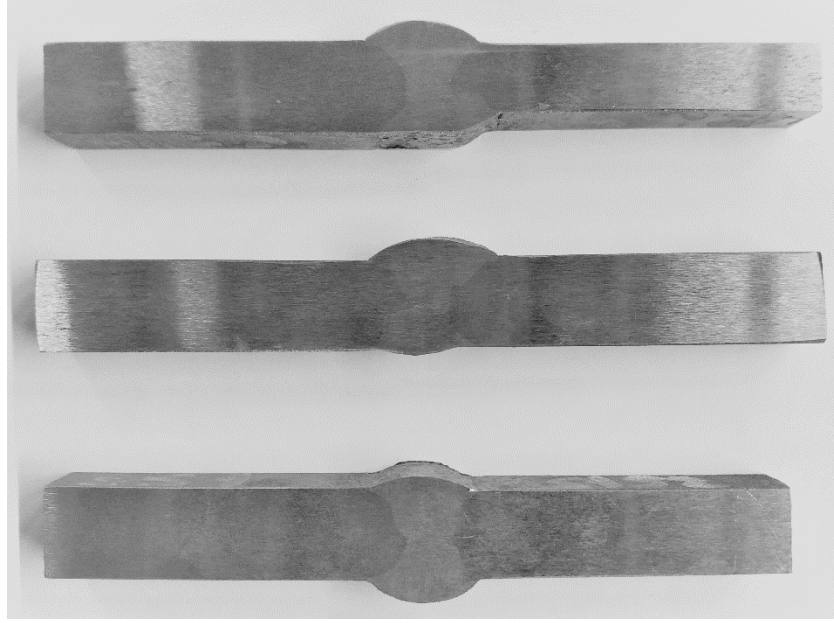
Şekil 7.19. Eğme testi için kullanılan çekme testi cihazı ve teste hazır numune görüntüsü.

7.4.4. Sertlik testi

Sertlik testi numuneleri, T1, T2 ve T3 test plakalarından ilgili standartta belirtildiği üzere ısı olmayan talaş kaldırma yöntemiyle kesilip hazırlanmış, EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak testler yapılmıştır. Testler için Emcotest DuraVision marka tam otomatize sertlik testi cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.20.). Sertlik testi numunelerinin görüntüleri Şekil 7.21.'de verilmiştir.

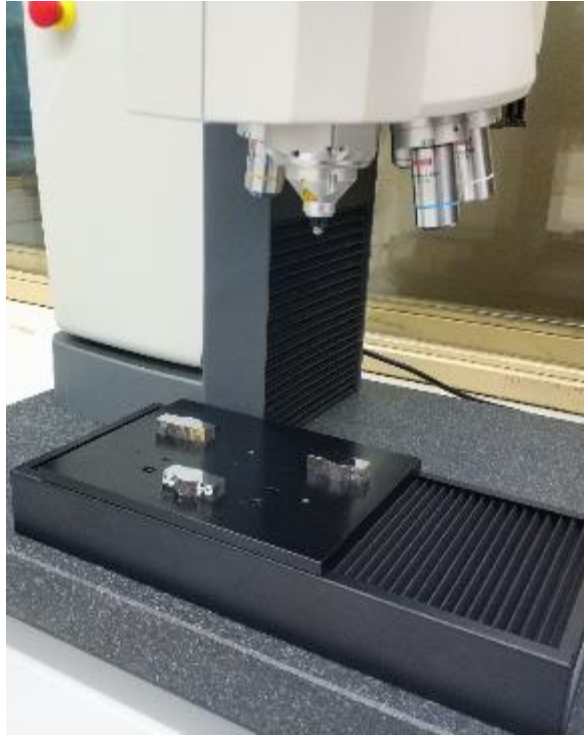


Şekil 7.20. Mikrosertlik test cihazı.



Şekil 7.21. Sertlik testi numuneleri.

Numunelere tam otomatize sertlik ölçüm cihazında, Vickers sertlik ölçüm yöntemine göre 10 kg'lık yük uygulanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.22.).



Şekil 7.22. Sertlik ölçümü.

7.4.5. Makro/mikro yapı testi

Test numuneleri EN ISO 17639 standardına göre hazırlanmış ve incelenmiştir. Metalografik yüzey işlemleri; 240-360-600-800-1000-1200-2500 numaralı zımparalarla yapılmış, 6 μ ve 1 μ 'luk çuha keçelerle çizik olmayacak şekilde parlatılmıştır. Metalografi yüzey hazırlama işlemleri için Struers marka metalografi cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.23.). Parlatma işlemi sonrası kaynak birleşim ve nüfuziyet bölgelerinin makro olarak incelenmesi için numuneler 10 ml HNO₃ ve 30 ml HCL dağlama ayracı ile dağlanmışır.



Şekil 7.23. Metalografi yüzey hazırlama cihazları.

Dağlama sonrası makro ve mikroyapı incelemesi için ise Nikon marka optik mikroskop cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.24.).



Şekil 7.24. Optik mikroskop.

Kaynaklı numunelerde; ana metallere, ITAB ve kaynak dikiş bölgelerindeki geçişlerde mikroyapı faz dönüşümlerinin daha detaylı incelenip yorumlanabilmesi için taramalı elektron mikroskopuyla da inceleme yapılmıştır. Bölgesel fazlara göre 250X ila 5000X aralığında büyütme kullanılmıştır. Bu incelemeler için Jeol JSM - 6060LV marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.25.).



Şekil 7.25. Jeol JSM- 6060LV Model SEM cihazı (Taramalı elektron mikroskopu).

BÖLÜM 8. DENEYSEL SONUÇLAR

8.1. Tahribatsız Muayene Sonuçları

Armox 500T zırh çeliğine uygun dolgu metali ile birleştirilen SAE 4140, C45 ıslah çelikleri ile S355J2 yapı çeliğinin test numuneleri (sırasıyla T1,T2 ve T3), kaynak dolgu metalinin özelliğine göre yapılan yüzeysel ve hacimsel kaynak muayeneleri sonucunda herhangi bir hata ve süreksizliğe rastlanmamıştır. Bu sonuçlara göre belirlenen kaynak parametreleri, birleştirilen malzemelerde tam nüfuziyet sağlayarak, beklenen birleştirme seviyesine ulaşabilecek yeterlilikte olduğu yorumu yapılabilir. Kaynaklı T1, T2 ve T3 test parçalarına yapılan tahribatsız muayenelerde elde edilen sonuçlara ait fotoğraflar bir önceki 7. bölümde verilmiştir.

8.2. Tahribatlı Muayene Sonuçları

8.2.1. Çekme testi sonuçları

Çekme testleri sonucunda, Zırh çeliği-S355J2 kaynaklı numune hariç diğer numuneler kaynaklı bölgeden kopmuşlardır. Zırh çeliği-S355J2 kaynaklı numunede (T3) ise S355J2 çeliğinden kopma gerçekleşmiştir. Bunun sebebi kaynak dolgu metali ile diğer ana malzeme zırh çeliğinin mekanik özelliklerinin, S355J2 (St52) yapı çeliğinden daha iyi olduğu kanısına varılabilir. T3 numunesinin çekme testi sonuçlarına bakıldığında sonuçların S355J2 çeliğinin mekanik özellikleri olduğu aşikardır. Yüksek mekanik özelliklere sahip zırh çeliklerinin kaynaklanması sonucunda oluşan kaynaklı yapının, zırh çeliğinin mekanik özelliklerine ulaşması günümüz teknolojisinde pek mümkün değildir. Bu bağlamda zırh çeliğine kaynaklanan diğer grup SAE 4140 ile DIN C45 ıslah çelikleri numunelerinin (T1 ve T2), çekme testi sonuçlarına göre oluşan kaynaklı yapıların mekanik özelliklerinin, ana malzemelerin mekanik özelliklerine göre zayıf

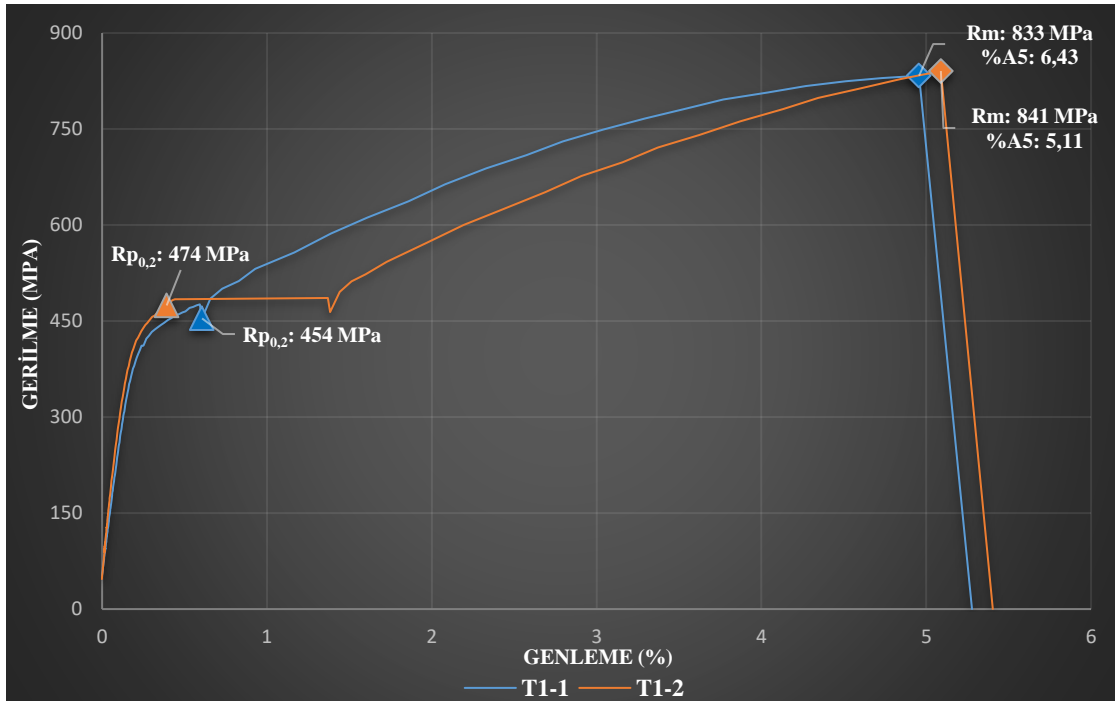
olduğu söylenebilir. Bu durumda kaynak dolgu metalinin mekanik özelliklerinin, kaynaklı ana malzemelerin mekanik özelliklerinden daha düşük olduğu sonucu çıkarılır. Bu sonuçlara göre kaynaklı numunelerin kopma yerinin kaynak metali bölgesi olması beklenen bir durum olması gerekir. İstisna olarak zırh çeliği-S355J2 kaynaklı numunesinde S355J2 malzemesinin mekanik özelliklerinin zırh çeliğine ve dolgu metaline göre zayıf olması sebebiyle kopma, kaynak metali yerine S355J2 malzemedan gerçekleştiğini belirtmiştik, bu da beklenen bir durumdur. Sonuçlara göre kaynaklı yapıların akma, çekme dayanımları ve yüzde uzama gibi değerlerinin birbirlerine göre üstünlüklerinin kıyaslanması faydalı olacaktır. Yüksek akma ve çekme dayanımı beklenen kaynaklı imalat tasarımlarında, östenitik dolgu metali ile birleştirdiğimiz T1 numunesinin, yine aynı özellikte dolgu metali ile birleştirilen T2 ve T3 numunelerine göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. T3 numunesini bu karşılaştırmada kaynaklı ana malzeme S355J2'nin mekanik özelliklerinden dolayı en düşük mukavemete sahip numune olarak değerlendirebiliriz. Diğer iki numunelerin kaynak metali bölgelerini kıyaslayacak olursak T1 numunesinin T2'ye göre kısmen de olsa daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Bu sonuçlara göre ArmoX 500T zırh çeliğinin mekanik özelliklerinin diğer kaynaklı ana malzemelerin ve dolgu metalinin mekanik özelliklerine göre daha üstün özelliklerde olduğunu görmekteyiz. Kaynaklı imalatlarda, birleştirilen metallerin özelliklerinin yanında kaynak parametrelerinin seçiminin ne kadar önemli bir kriter olduğu da göz önünde bulundurulmalı, parametreler optimum özellikler sağlanacak şekilde belirlenmelidir.

Tablo 8.1. Çekme testi sonuçlarının tablo görünümü.

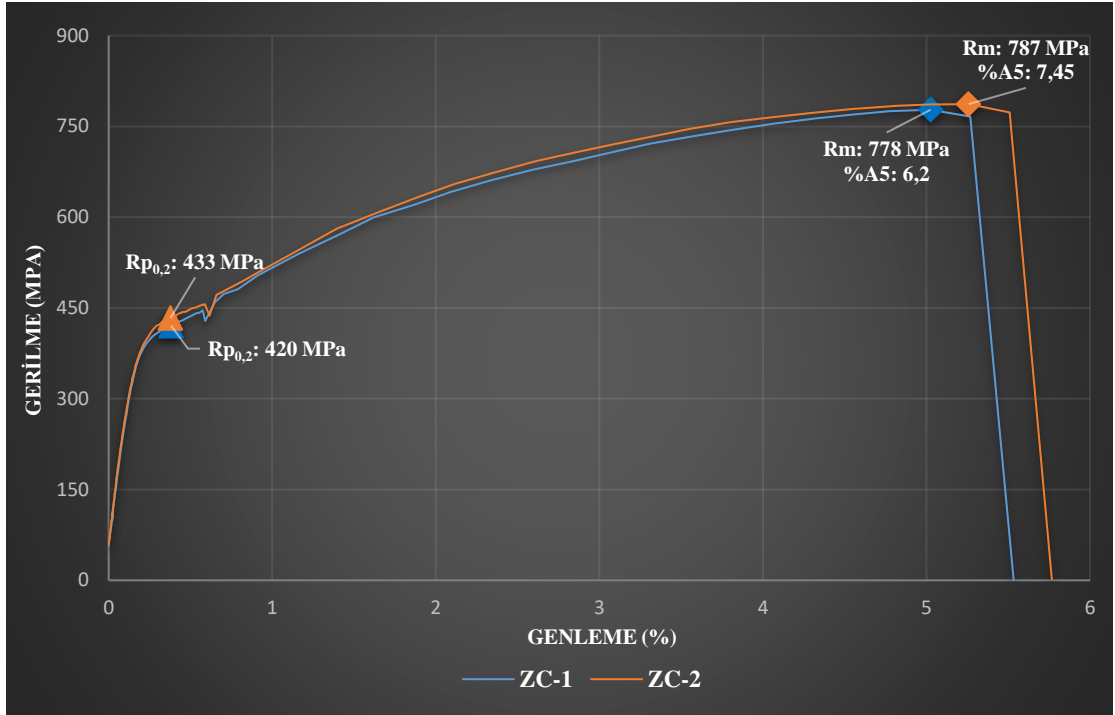
Test Numuneleri		Akma Dayanımı ($R_{p0,2}$) MPa	Çekme Dayanımı (R_m) MPa	Uzama (A_5) %
T1	T1-1	454	833	6,43
	T1-2	474	841	5,11
T2	T2-1	420	778	6,2
	T2-2	433	787	7,45
T3	T3-1	391	489	21,3
	T3-2	375	467	21,8

Çekme testi sonuçlarında elde edilen veriler Tablo 8.1.'de; T1-1 ve T1-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri Şekil 8.1.'de; T2-1 ve T2-2 nolu numunelere ait

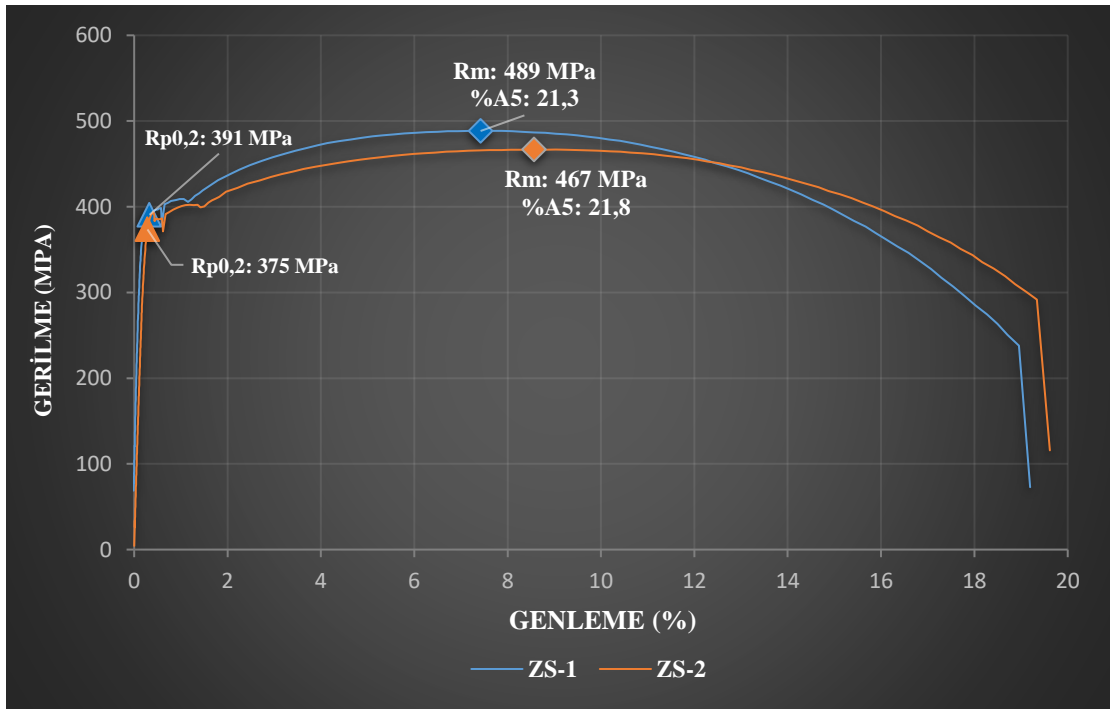
çekme testi grafikleri Şekil 8.2.'de; T3-1 ve T3-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri ise Şekil 8.3.'te verilmiştir. Çekme testi sonrası kopmuş numunelerin görüntüleri Şekil 8.4.'te; Çekme testi sonrası T1-1 ve T1-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri Şekil 8.5'.te; çekme testi sonrası T2-1 ve T2-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri Şekil 8.6.'da; çekme testi sonrası T3-1 ve T3-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri ise Şekil 8.7.'de gösterilmiştir. Çekme testi sonuçları ile oluşturulan grafik ise Şekil 8.8.'de verilmiştir.



Şekil 8.1. T1-1 ve T1-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri.



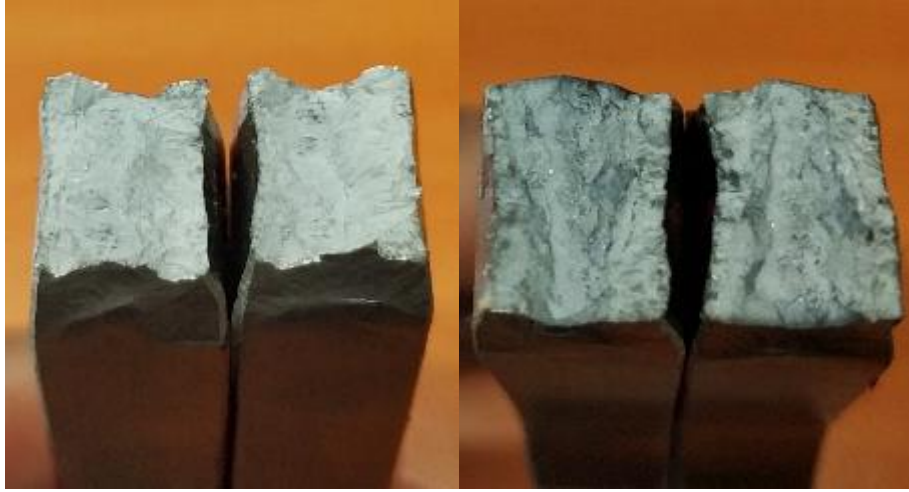
Şekil 8.2. T2-1 ve T2-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri.



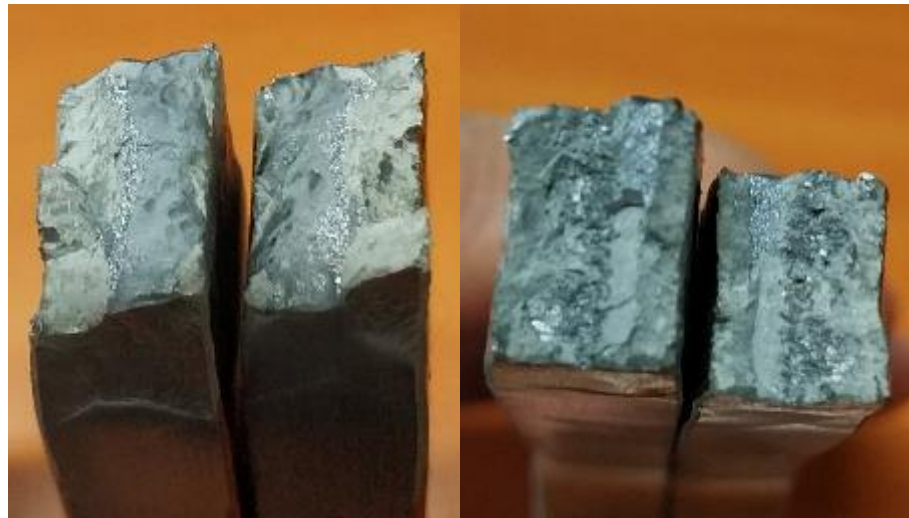
Şekil 8.3. T3-1 ve T3-2 nolu numunelere ait çekme testi grafikleri



Şekil 8.4. Çekme testi sonrası numunelerin görünümü.



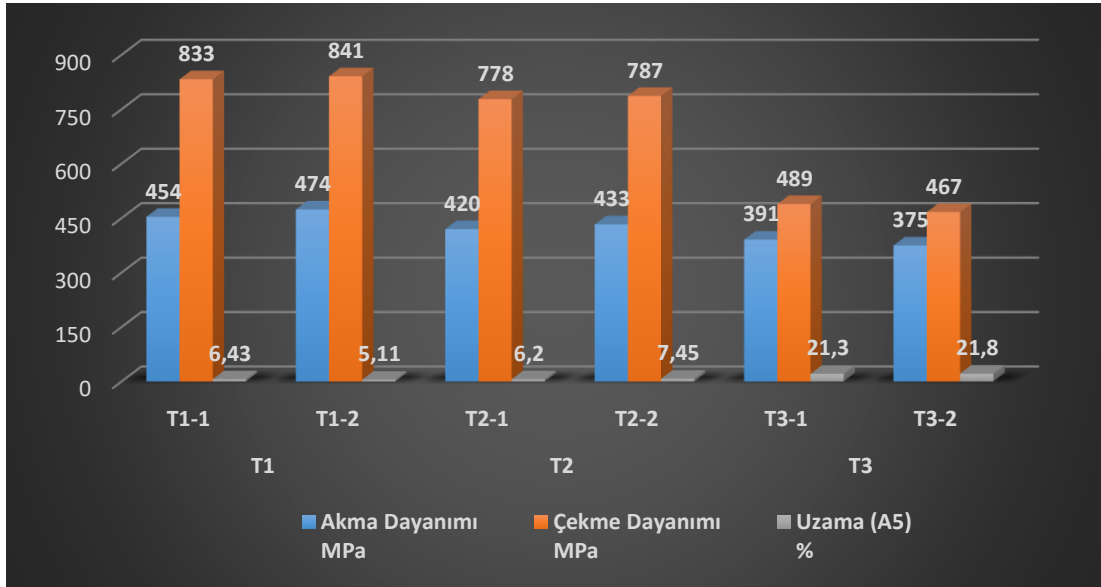
Şekil 8.5. Çekme testi sonrası T1-1 ve T1-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.



Şekil 8.6. Çekme testi sonrası T2-1 ve T2-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.



Şekil 8.7. Çekme testi sonrası T3-1 ve T3-2 nolu numunelerin kopmuş yüzey görüntüleri.



Şekil 8.8. Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi.

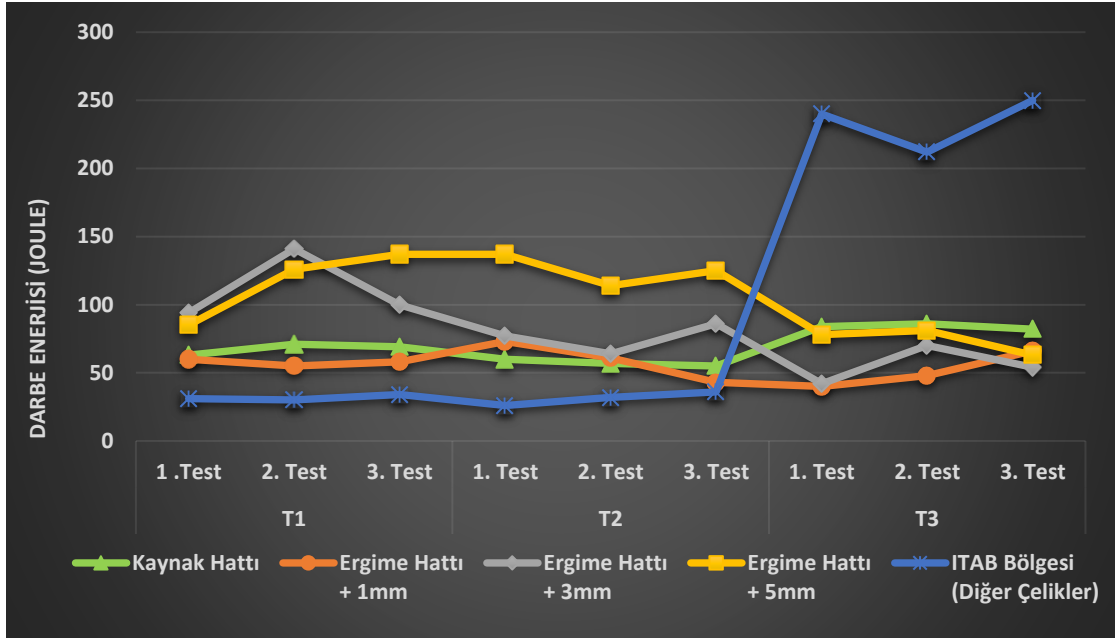
8.2.2. Çentik darbe testi sonuçları

T1, T2 ve T3 nolu test plakalarından Şekil 7.16.'da gösterilen biçimde kaynak hattı, ergime çizgisinden 1 mm uzaklıkta, ergime çizgisinden 3 mm uzaklıkta, ergime çizgisinden 5 mm uzaklıkta ve ısı etkisi altındaki bölgelerden 3'er adet olmak suretiyle toplamda 45 adet V-çentik (Charpy) darbe testi numunesi hazırlanmış ve zırh çeliğinin darbe enerjilerinin ilgili standartlarda -40 °C sıcaklıkta belirtilmesinden dolayı testler bu sıcaklıkta yapılmış, test sonuçları Tablo 8.2.'de, sonuçların bölgesel grafik

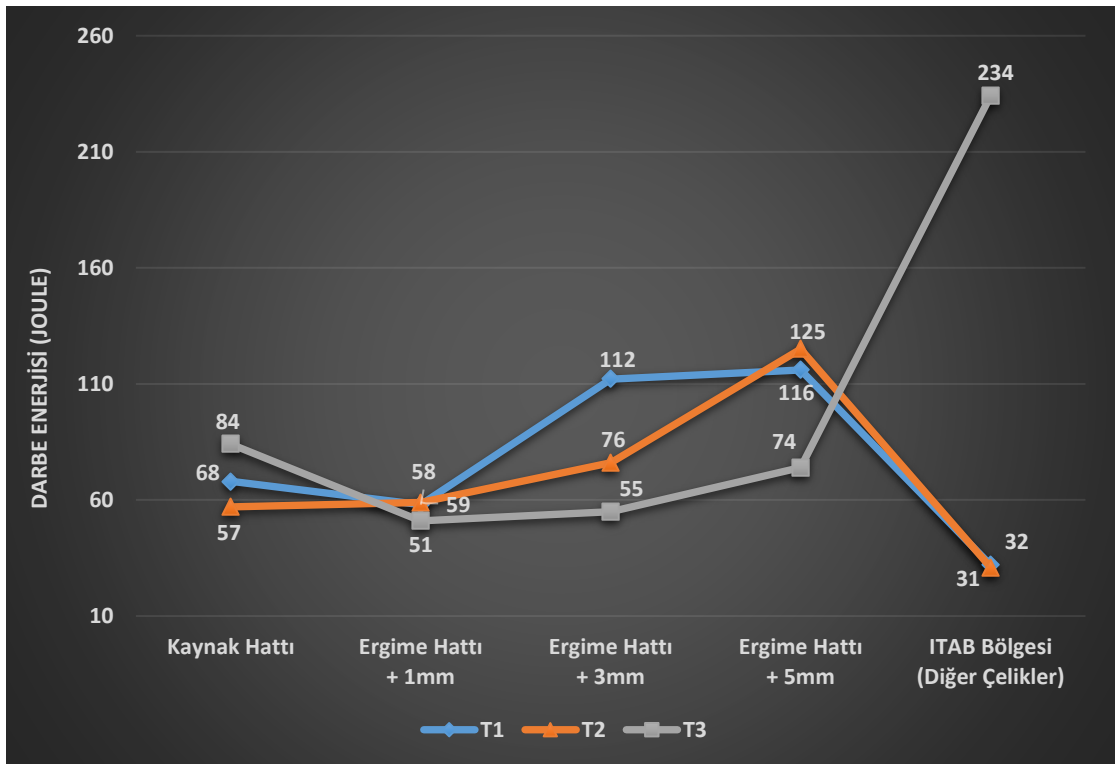
görünümü Şekil 8.9.'da, numunelerin ortalama darbe enerjileri değerlerinin bölgesel grafiği ise Şekil 8.10.'da verilmiştir. Elde edilen çentik darbe enerjisi değerleri ile kırık yüzey görüntüleri birbirleri ile uyumludur. Değerler, çalışma kriteri olarak ilgili standartlarda talep edilen değerlerin üzerinde çıkmış ve beklenen gereklilikleri sağlamıştır. Kırık numunelerin fraktografisinde ise yüzeylerde, sünek ve gevrek olarak karışık kırılma karakterizasyonu olduğu ve daha çok sünek kırılma yapısı görülmekle birlikte bölgesel olarak kristalin (granüler) yüzey dediğimiz gevrek kırılma yapısı da mevcuttur. Sadece zırh çeliğine kaynaklı SAE 4140 ve C45 çeliklerinin ısı etkisi altında bulunan bölgelerdeki numunelerde, darbe enerjisi değerlerinden de anlaşılacağı üzere, kristalin yüzeyin diğer bölgelerdeki numunelere göre fazla olduğu, dolayısıyla bu bölgenin sünek-gevrek geçiş sıcaklığına yakın olduğu değerlendirilebilir. Temperlenmiş martenzit fazlarında tokluk yüksek olacağı için, darbe enerjisinin de yüksek olması beklenir. Zırh çeliğinin ITAB bölgelerinde darbe enerjisi değerlerinin yüksek olması bu durumla bağdaştırılabilir. Yapı çeliğinde ise ısı tesiri altındaki bölgeden alınan numunelerde darbe enerjilerinin diğer bölgelerdeki numunelere göre yüksek çıkması beklenen bir durumdur. Çünkü kullanılan çeliğin kalitesi J2 skalasında olması nedeniyle eksi derecelerde yüksek darbe direncine sahip olması ve çeliğin alaşım elementi olarak %1'den fazla Mangan içermesi nedeniyle, bu bölgedeki darbe tokluğunun yüksek olmasına etken olduğu düşünülmüştür.

Tablo 8.2. Darbe testi sonuçları tablo görünümü.

Numuneler	Test Sıcaklığı °C	Zırh Çeliği Bölgesi				Zırh Çeliğine Kaynaklı Diğer Çelikler	
		Kaynak Hattı	Ergime Hattı + 1mm	Ergime Hattı + 3mm	Ergime Hattı + 5mm	ITAB Bölgesi	
T1	1. Test	-40	63 J	60 J	94 J	85 J	31 J
	2. Test	-40	71 J	55 J	141 J	126 J	30 J
	3. Test	-40	69 J	58 J	100 J	137 J	34 J
T2	1. Test	-40	60 J	73 J	77 J	137 J	26 J
	2. Test	-40	57 J	61 J	64 J	114 J	32 J
	3. Test	-40	55 J	43 J	86 J	125 J	36 J
T3	1. Test	-40	84 J	40 J	42 J	78 J	240 J
	2. Test	-40	86 J	48 J	70 J	81 J	212 J
	3. Test	-40	82 J	66 J	54 J	63 J	250 J

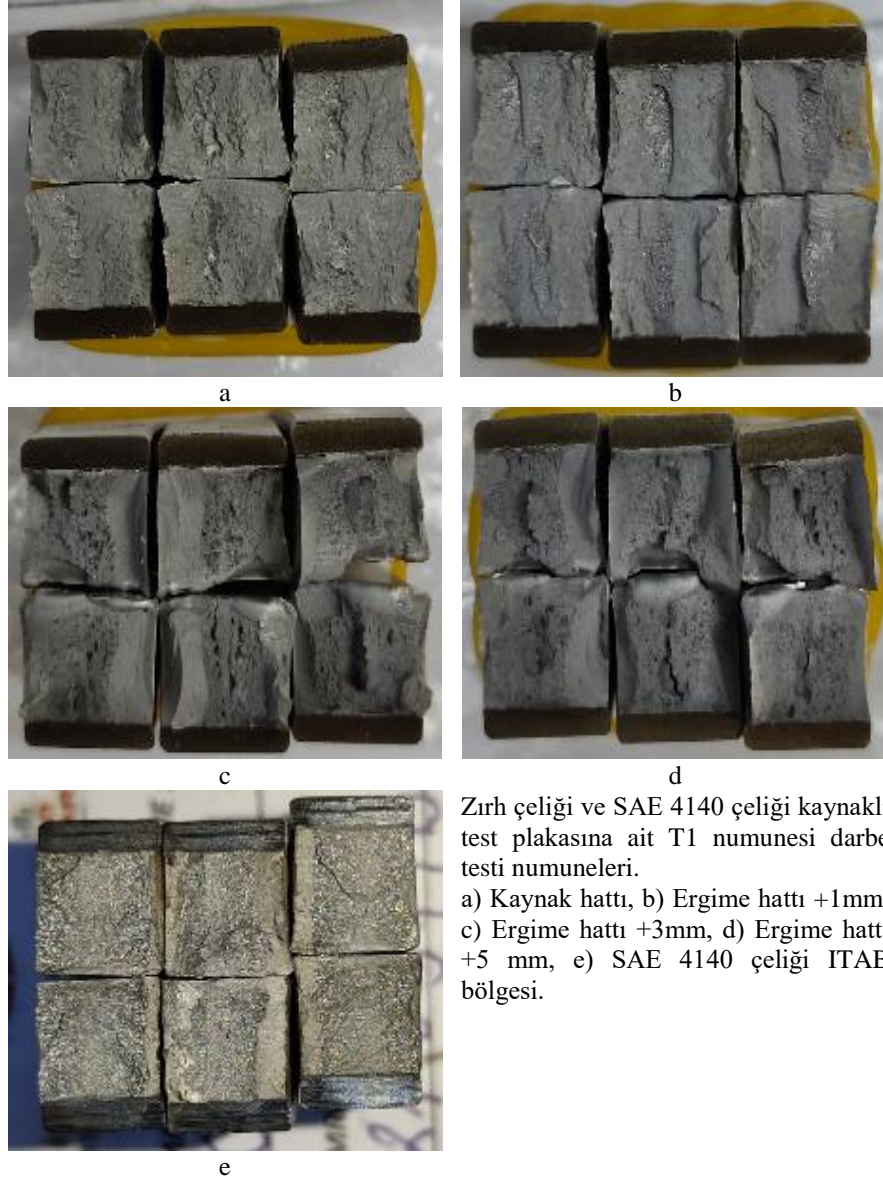


Şekil 8.9. Çentik darbe testi sonuçları grafiği (-40 °C).

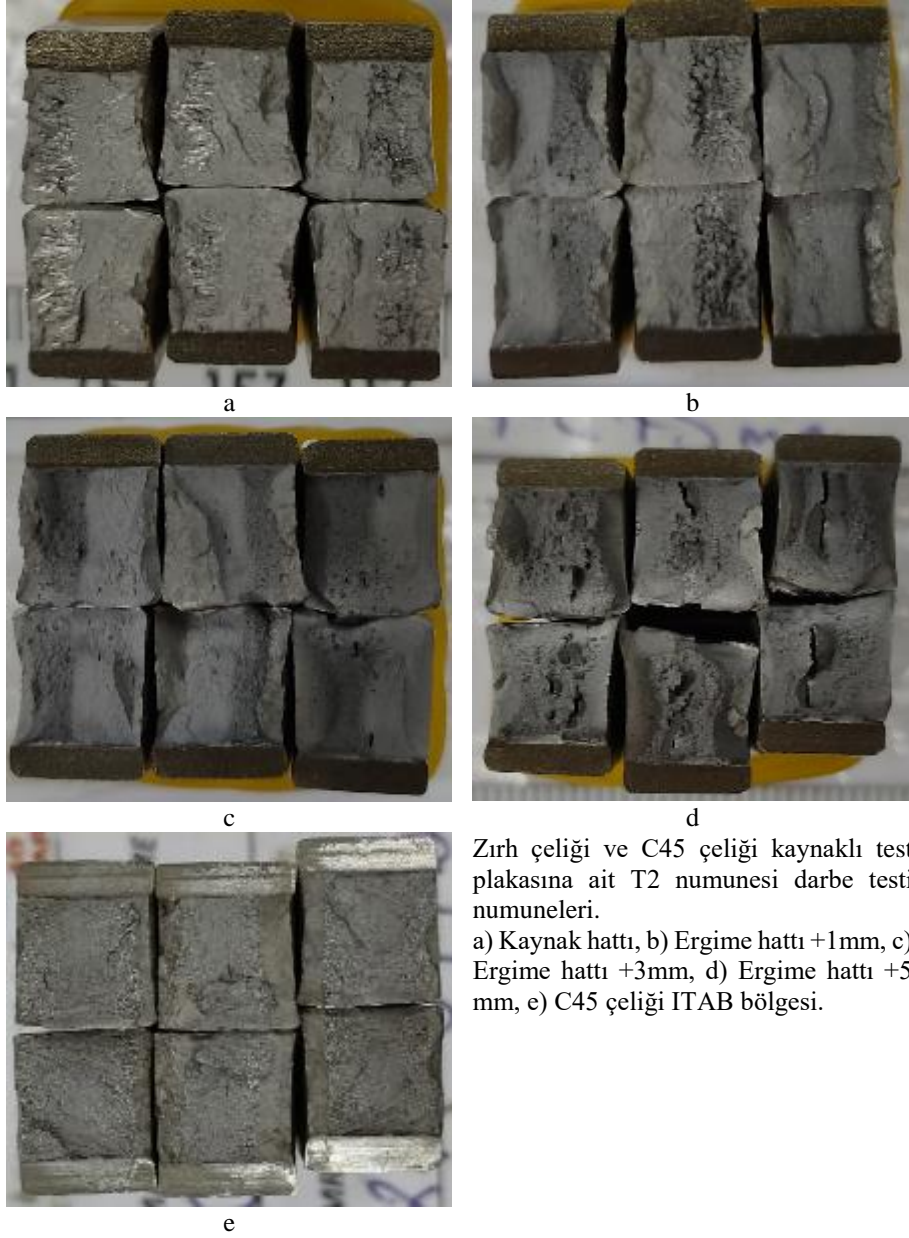


Şekil 8.10. Çentik darbe testi değerlerinin bölgesel ortalama grafiği.

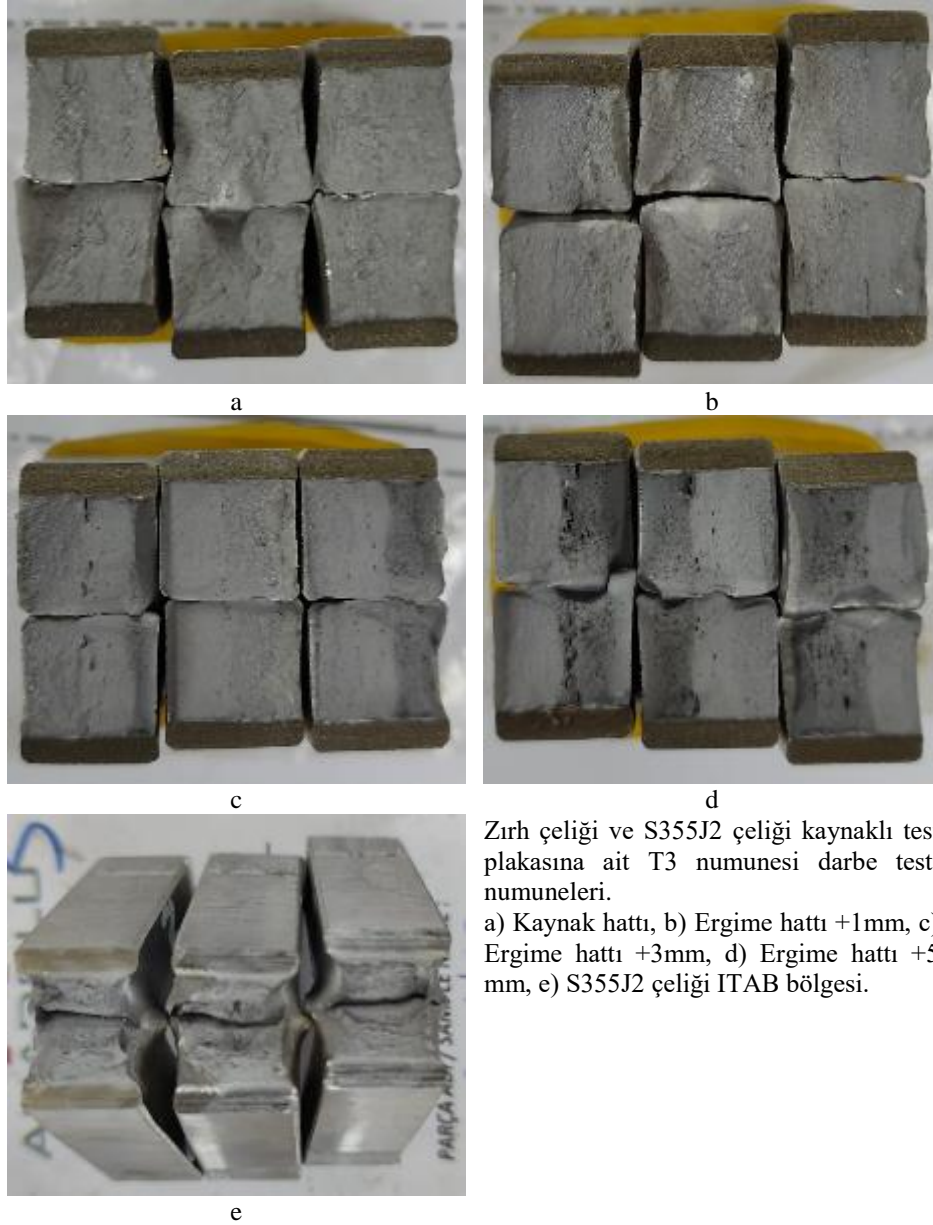
Numunelerin kırık yüzeylerinin görünümü Şekil 8.11., Şekil 8.12. ve Şekil 8.13.'te verilmiştir.



Şekil 8.11. T1 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.



Şekil 8.12. T2 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.



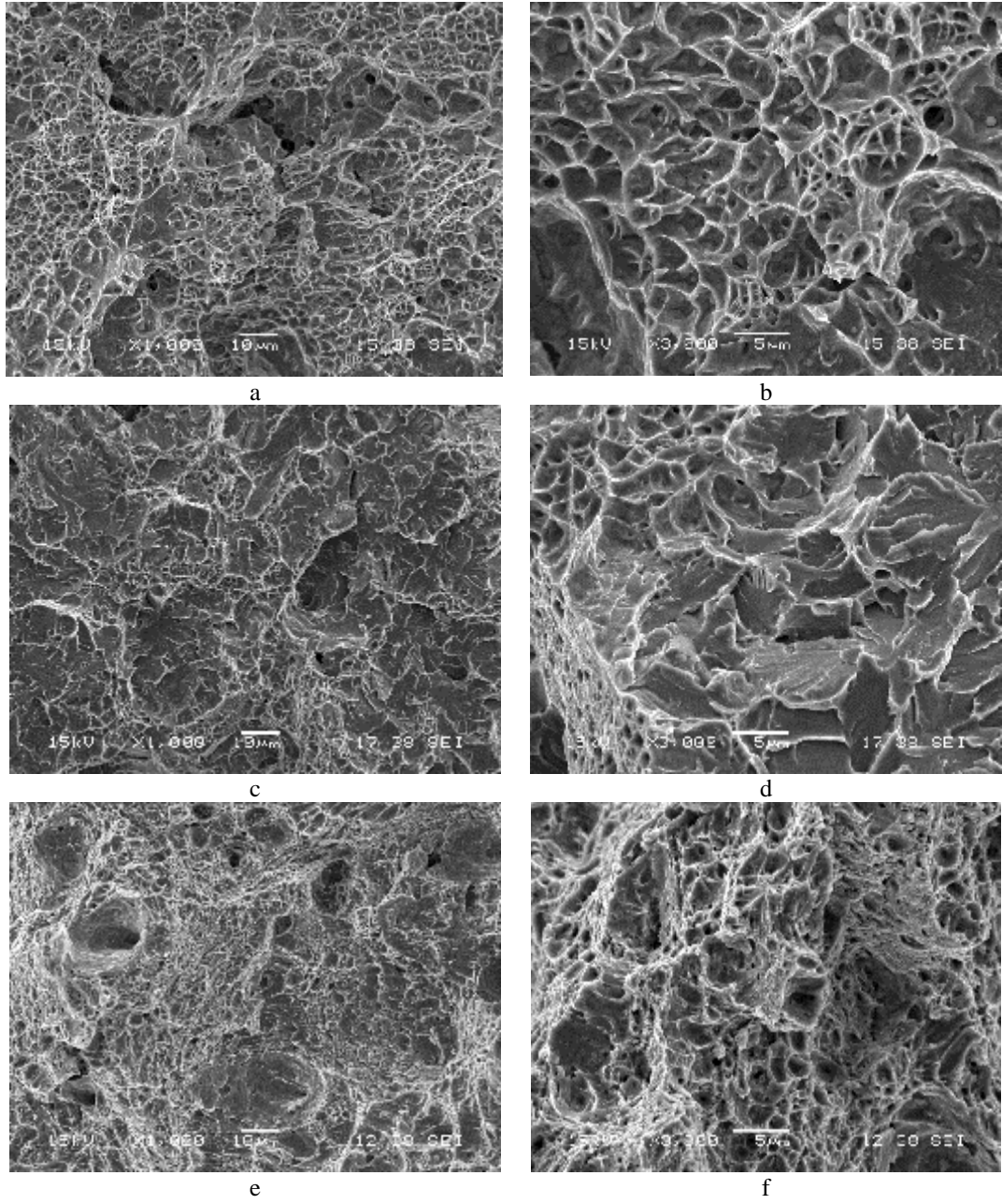
Zırh çeliği ve S355J2 çeliği kaynaklı test plakasına ait T3 numunesi darbe testi numuneleri.

a) Kaynak hattı, b) Ergime hattı +1mm, c) Ergime hattı +3mm, d) Ergime hattı +5 mm, e) S355J2 çeliği ITAB bölgesi.

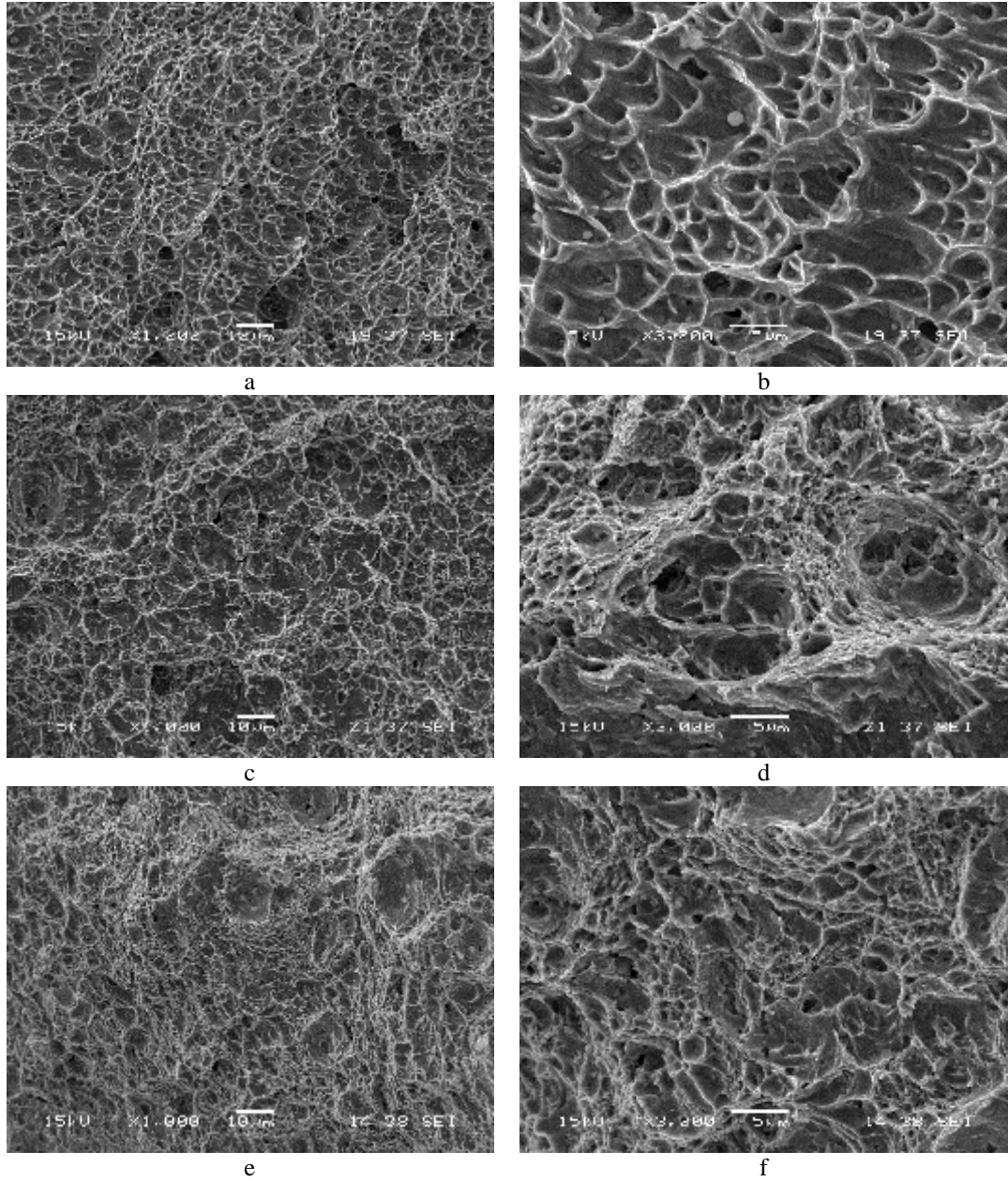
Şekil 8.13. T3 test plakasına ait darbe testi numuneleri kırık yüzeyleri.

Çentik darbe deneyi uygulanan numunelerin kırık yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopuyla da (SEM) incelenmiştir. Kırılma yüzeylerine bakıldığında, kaynak dikişi ve zırh çeliğine bağlı ITAB bölgelerinde tipik sünek kırılma morfolojisi görülmekte ancak yer yer gevrek kırılmalar olduğu da saptanmıştır. Bu numunelerin SEM görüntüleri Şekil 8.14., Şekil 8.15., Şekil 8.16.'da verilmiştir. Çukurcuklu (dimples) veya lifli şekilde ifade edilen kırık yüzeyler malzemenin sünek şekilde kırıldığını göstermektedir. Bu çukurların dibinde çok kez metalik olmayan kalıntılara rastlanır. Boşluklu kırılmalar (çukurcuklu) öncelikle taneleriçi (transgranüler) olarak

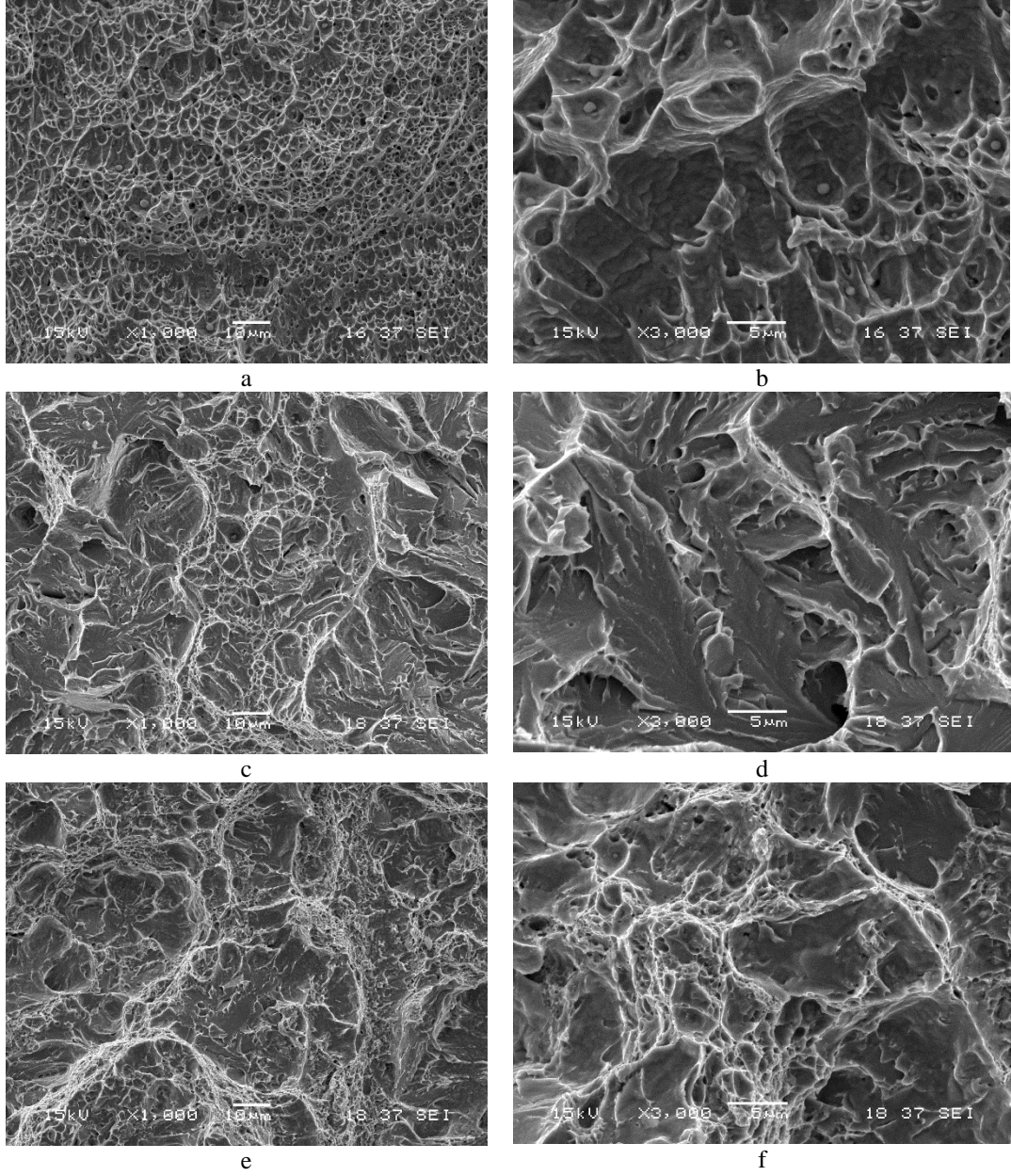
ilerler. Sünek kırılmaların kayma kırılması şeklinde olduğu bölgesel olarak görülmüştür. Bu kayma kırılmalarındaki lifli yapının kesme yüklemesi sonucu oluşan yönlenmiş parabolik şekil aldığı yer yer tespit edilmiştir. Bazı bölgelerde özellikle kaynak dikişi bölgesinde koruyucu gaz içerisindeki karbondioksit miktarının az olması nedeni ile çok az miktarda meydana gelen inklüzyonların neden olduğu derin ve gevrek forma sahip çukurlar göze çarpmaktadır. Inklüzyonların olduğu bölge daha derin olmakla beraber diğer kısımlarda çukurcuklar lifli şekilde görülmüştür. Bu inklüzyonların hemen yanında klivaj kırılma bölgeleri oluşmaktadır. Bu nedenle çatlak başlangıcının inklüzyonların çevresinde başladığı ve daha çabuk ilerlediğinden daha az enerji harcadığı yorumu yapılabilir. Klivaj kırılmalarda nehir izleri belirgindir ve gevrek tarzda taneleriçi kırılmadır. Çukurcukların içerisinde bulunan küresel kalıntılara nokta EDS analizi yapılmış; yapıların oksit kompleks yapıya sahip olduğu, SiO_2 , MnO , Al_2O_3 ve ITAB bölgesinden alınan bazı numunelerin açık hava ortamı şartlarında oksitlenmesinden dolayı Fe_2O_3 formunda olduğu, grafiklerde oluşan piklerden tahmin edilmiştir. EDS nokta analizleri Şekil 8.17., Şekil 8.18., Şekil 8.19.'da verilmiştir.



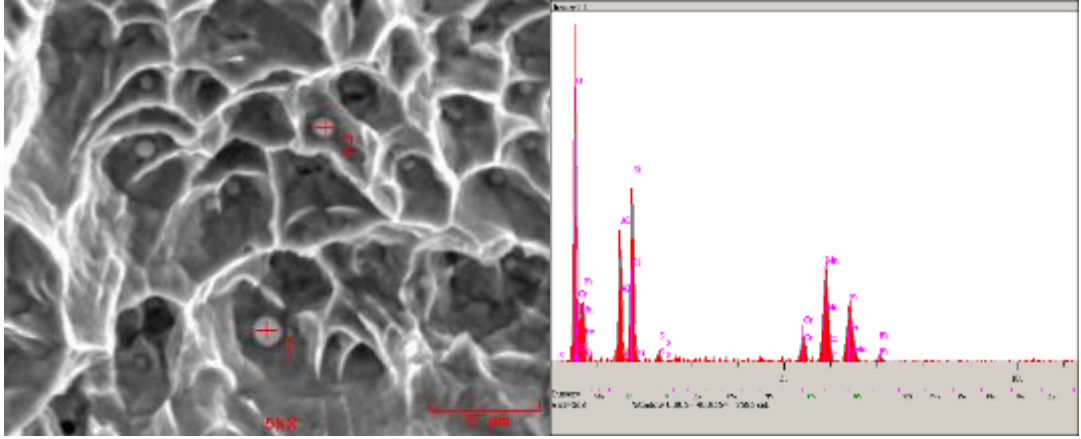
Şekil 8.14. T1 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.



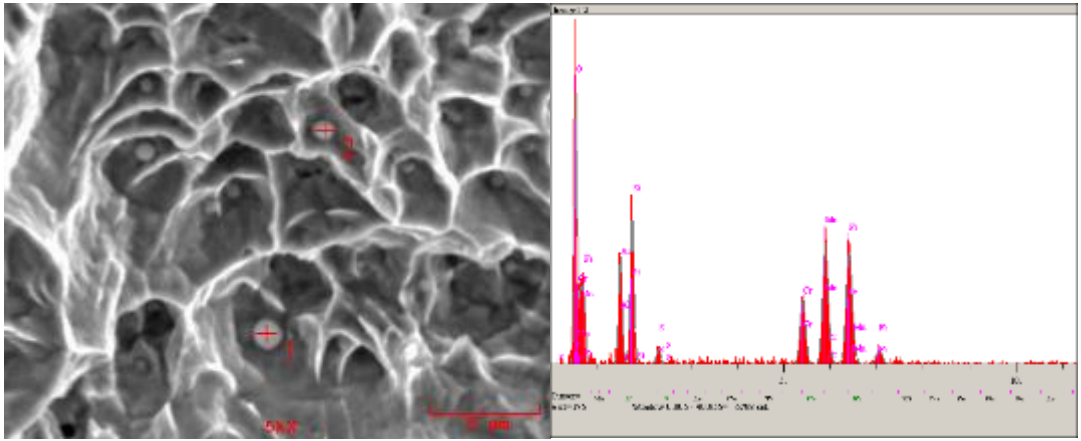
Şekil 8.15. T2 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırk numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.



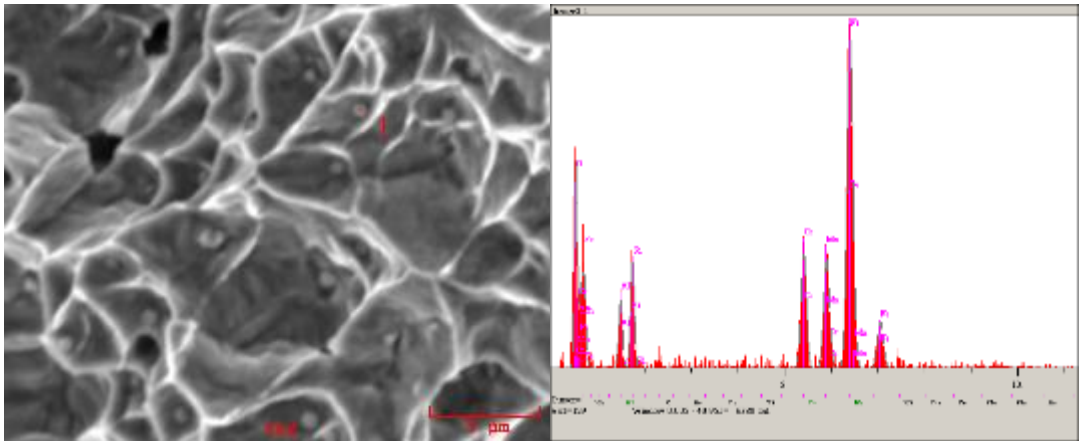
Şekil 8.16. T3 numunesine ait kaynak dikişi ve zırh çeliği ITAB bölgeleri kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) Kaynak dikişi bölgesi; c, d, e, f) ITAB bölgeleri.



Şekil 8.17. Kaynak dikişi bölgesindeki 1 nolu küresel kalıntının EDS nokta analizi.



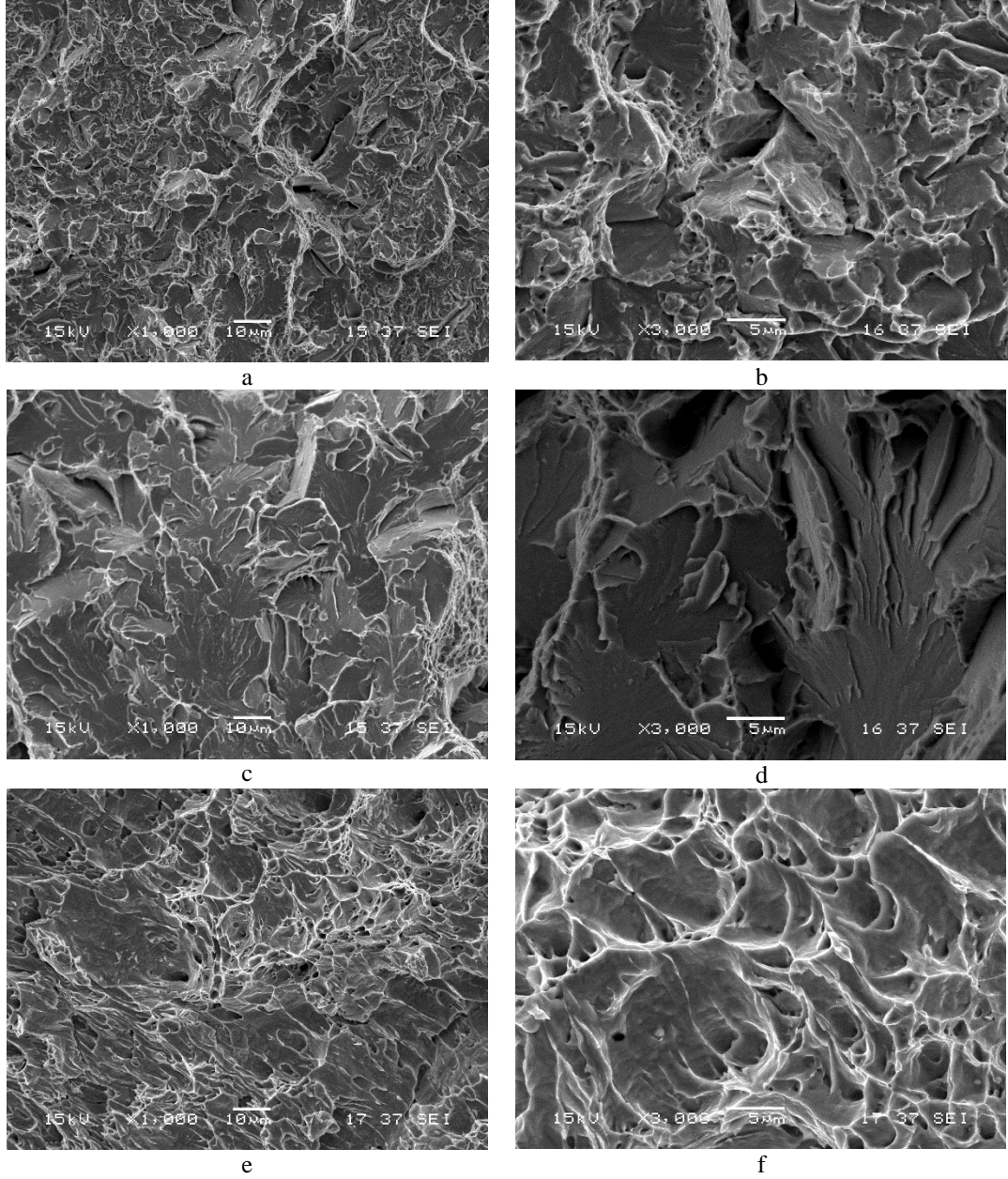
Şekil 8.18. Kaynak dikişi bölgesindeki 2 nolu küresel kalıntının EDS nokta analizi.



Şekil 8.19. ITAB bölgesindeki çentik darbe numunesinde görülen küresel kalıntının EDS nokta analizi.

Zırh çeliğine kaynaklı diğer çeliklerin ısı tesiri altındaki bölgelerden alınan çentik darbe numunelerinin kırık yüzeylerinde yapılan SEM inceleme görüntüleri Şekil

8.20.'de verilmiş, incelemelerde SAE 4140 ve C45 çeliklerinde kayma tipi sünek kırılma ve çukurcuklu dediğimiz dimples yapıları ile birlikte bölge bölge gevrek tipinde klivaj kırılma da görülmektedir. SAE 4140 numunelerinde kayma sünek kırılma yapısı daha fazla görülürken, C45 numunelerde bu yapı daha az görülmekte ve klivaj tipte kırılma oranına göre düşük orandadır. Şekil 8.20. görselinde kayma hatları ve klivaj kırılma karakteristiği olan nehir (river) izleri belirgin olarak göze çarpmakta ve kayma hatları sünek bölgelerin oluşmasını takip ederek plastik deformasyon ortaya çıkarmaktadır. Klivaj kırılmalar gevrek tarzda taneleriçi kırılmadır diye belirtmiştik ve bu tip kırılmada daha az enerji harcanır ve sonuçlarda bunu doğrulamaktadır. S355J2 ITAB bölgesindeki numunelerde ise yine çoğunlukla çukurcuklu dediğimiz dimples yapıları görülmekte ve sünek tipte kırılma gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Malzemede kayma ile deformasyon sonucu oluşan boşluklar (çukurcuklar) birleşene kadar genişlemiştir. Kesme yüklemesi ile bu boşlukların parabolik şekil aldığı bazı bölgelerde yine görülmüştür. Malzeme içerisindeki kalıntılardan dolayı sünek karakteristikli derin çukurcuklar oluştuğu da göze çarpmaktadır.



Şekil 8.20. T1, T2 ve T3 numunelerine ait zırh çeliğine kaynaklı diğer çeliklerin ITAB bölgelerindeki kırık numunelerin SEM görüntüleri; a, b) T1 numunesi ITAB bölgeleri; c, d) T2 numunesi ITAB bölgeleri; e, f) T3 numunesine ait ITAB bölgeleri.

8.2.3. Eğme testi sonuçları

T1, T2 ve T3 nolu numunelerden, kaynak bölgesi üç nokta eğme testinde merkezde olacak şekilde 2'şer adet test numuneleri çıkarılmıştır. Bu testte numunelere, mandrel çapı 45 mm, mesnetler arası mesafe 75mm ve test hızı ise 0,3mm/sn olacak şekilde yükleme yapılmıştır. Test sonuçlarına göre T1-1 numunesi 8,08 kN'de 41°'de, T1-2 numunesi 9,5 kN'de 41,5°'de; T2-1 numunesi 6,78 kN'de 30°'de, T2-2 numunesi 7,63

kN'de 32° yüklerde ve derecelerde kaynak bölgesinden kırılmıştır. Sonuçları Tablo 8.3.'te görmekteyiz.

Tablo 8.3. 3 nokta eğme testi sonuçları.

Test Numuneleri	Numune Kalınlığı (mm)	Mandrel Çapı (mm)	Mesnetler Arası Mesafe (mm)	Yükleme Hızı (mm/sn)	Kırılma Yüğü (kN)	Kırılma Açısı (°)	
T1	T1-1	12	45	75	0,3	8,08	41
	T1-2	12	45	75	0,3	9,5	41,5
T2	T2-1	12	45	75	0,3	6,78	30
	T2-2	12	45	75	0,3	7,63	32
T3	T3-1	12	45	75	0,3	-	-
	T3-2	12	45	75	0,3	-	-

T3-1 ve T3-2 numunelerinde herhangi bir kırılma ve deformasyon gözlenmemiş, kaynaklı bölgenin yakınından S355J2 sac malzeme üzerinden 180° bükülme gerçekleşmiştir. Eğme hasarlarını incelediğimizde zırh çeliğine kaynaklı malzemelerin farklı sünekliğe sahip olduğunu görebiliyoruz. Bu nedenle bu numuneleri çelik bazında sınıflandırarak bu testi değerlendirmek daha doğru olacaktır. St52 (S355J2) çeliğinin kaynaklı numunelerinde (T3-1 ve T3-2), yapı çeliğinin sünek davranışlı karakteristiğe sahip olması sebebiyle bu çelik yüzeyinden tam bükülme gerçekleşmiştir. SAE 4140 ve C45 çeliklerinin kaynaklı numunelerine baktığımızda ise kırılmaların kaynak bölgesinden oluştuğu görülmekte, kırılma açlarına bakıldığında ise C45 malzeme numunelerinin (T2-1 ve T2-2) kaynak bölgelerinin daha az kırılma açısına sahip olduğu, bu nedenle de eğme testinde daha az süneklik gösterdiği yorumu yapılabilir. Test numunelerine ait açılı kırılma ve bükülme görüntüleri Şekil 8.21.'de; kırık yüzeylerin görüntüleri ise Şekil 8.22.'de verilmiştir.



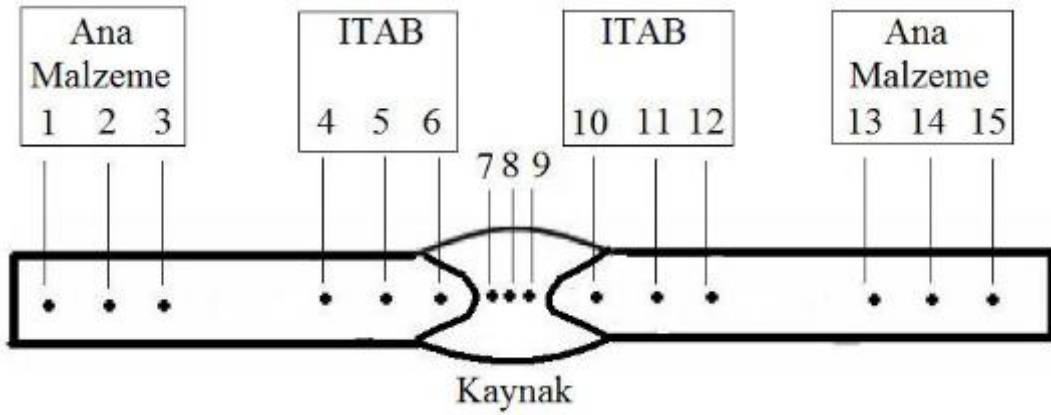
Şekil 8.21. Numunelerin açılı kırılma ve bükülme görselleri.



Şekil 8.22. Eğme testi numunelerinin kırık yüzey görselleri.

8.2.4. Sertlik testi sonuçları

Sertlik testleri, Vickers sertlik ölçüm yöntemine göre ilgili standartta belirtilen (HV10) 10 kg'lık yük ile yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin numaralı şematik gösterimi Şekil 8.23.'te verilmiştir.



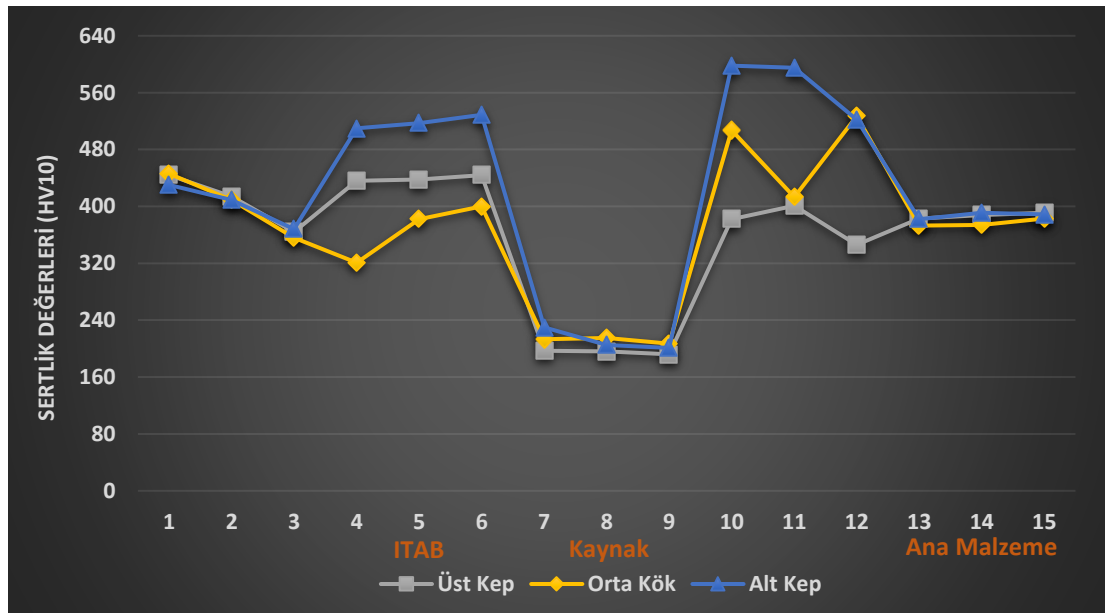
Şekil 8.23. Sertlik ölçüm bölgeleri numaralı şematik gösterimi.

Her numuneden üst kep, alt kep ve kaynak kök bölgelerinden olmak üzere 3'er sıra sertlik testi yapılmıştır. Her bir sıradan soldan sağa doğru, ana malzeme, ısı etkisi altındaki bölge (ITAB), kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve ana malzeme olmak üzere farklı bölgelerden sertlik değerleri alınmıştır. Her bölgeden 3'er adet sertlik ölçümü yapılmıştır. T1 numunesine ait sertlik değerleri Tablo 8.4.'te, grafiksel görünümü Şekil 8.24.'te; T2 numunesi için sertlik değerleri Tablo 8.5.'te, grafiksel görünümü Şekil 8.25.'te; T3 numunesine ait sertlik değerleri Tablo 8.6.'da, grafiksel görünümü ise Şekil 8.26.'da verilmiştir. Tüm kaynaklı numunelerin birbirleri ile karşılaştırılması amacıyla, her bir numunenin kendi içinde bölgelerine göre sertlik

değerlerinin (üst kep, kök kaynak, alt kep) ortalamaları ile oluşan sertlik dağılımları Tablo 8.7.'de, grafiksel görünümü ise Şekil 8.27.'de verilmiştir.

Tablo 8.4. T1 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.

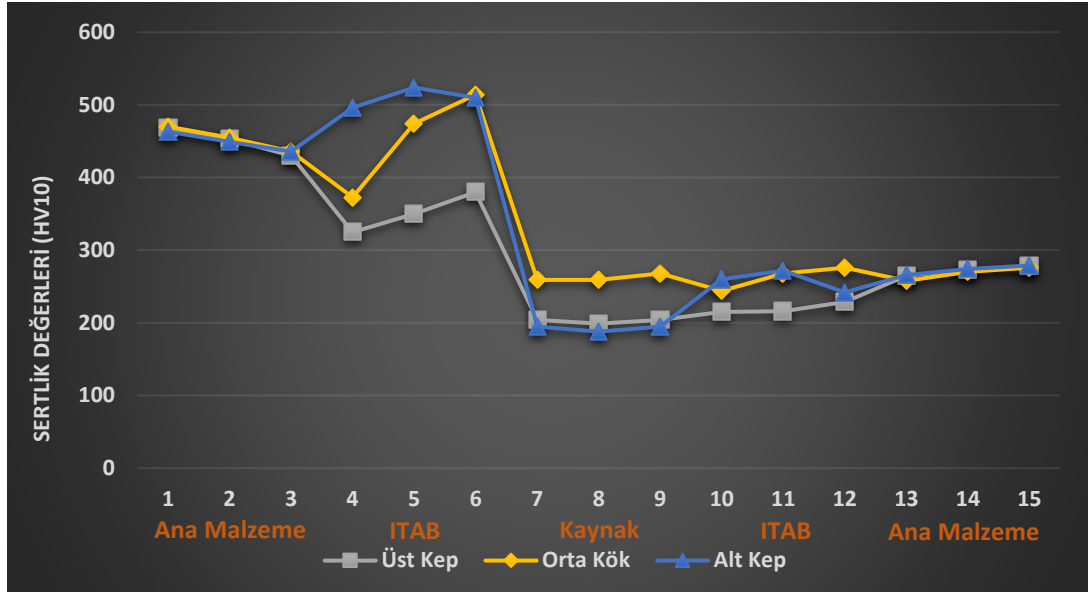
T1 (HV10)	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Üst Kep	444	414	364	436	438	444	197	196	192	382	401	346	383	388	391
Orta Kök	446	409	356	321	382	400	213	215	207	507	413	527	373	374	383
Alt Kep	430	409	368	510	517	529	230	205	201	598	595	522	382	391	389



Şekil 8.24. T1 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.

Tablo 8.5. T2 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.

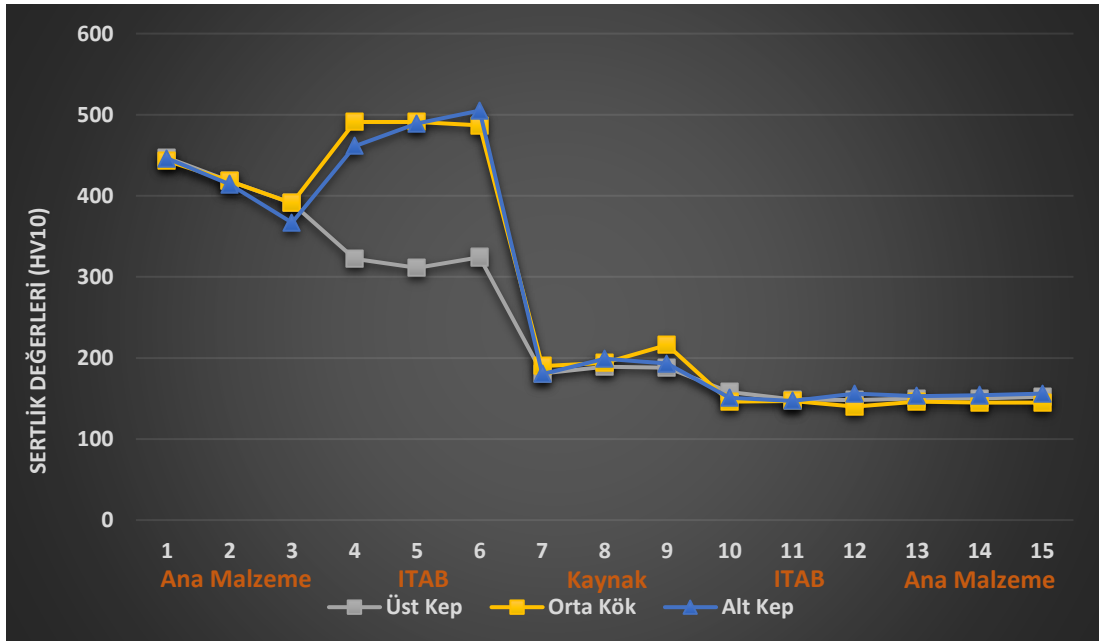
T2 (HV10)	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Üst Kep	468	453	430	325	350	380	204	199	204	215	216	229	265	273	278
Orta Kök	470	455	436	373	474	514	259	259	268	244	268	276	258	270	276
Alt Kep	463	449	436	496	524	510	195	188	195	260	272	242	266	274	279



Şekil 8.25. T2 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.

Tablo 8.6. T3 nolu numuneye ait sertlik ölçüm değerleri.

T3 (HV10)	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Üst Kep	447	418	391	322	311	324	181	189	188	158	149	148	150	150	152
Orta Kök	443	418	391	491	491	487	190	194	216	146	147	140	146	145	145
Alt Kep	446	414	367	461	489	505	180	199	193	151	147	156	153	154	156

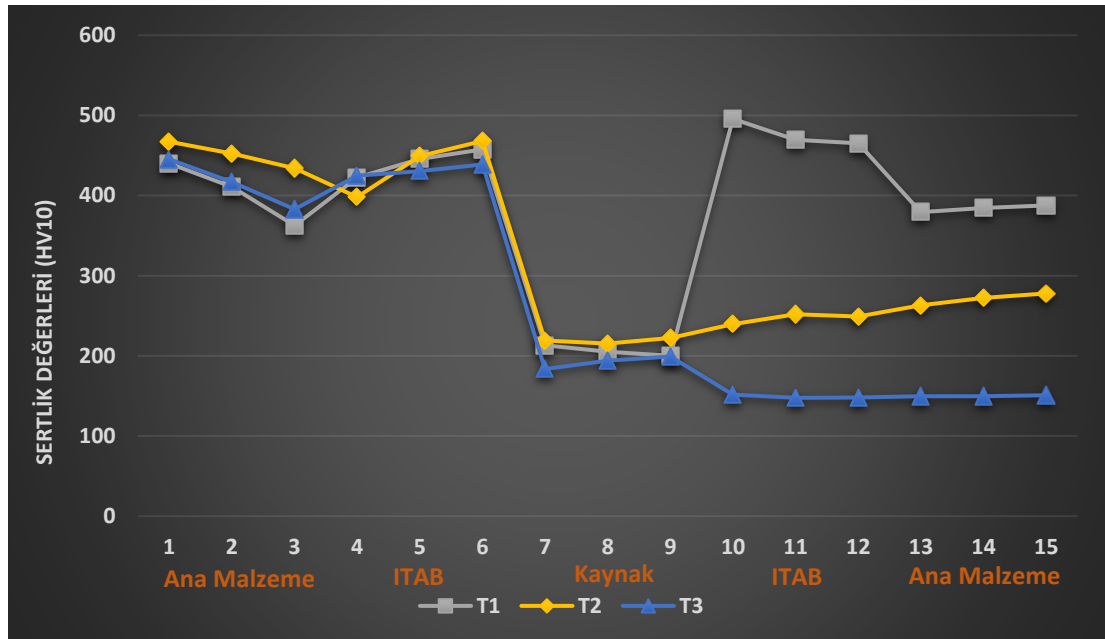


Şekil 8.26. T3 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılım grafiği.

Numuneler arasında sertlik değerlerinin karşılaştırması yapıldığında, Şekil 8.14.'teki grafikten de görüleceği üzere, zırh çeliğine kaynaklı diğer ana malzemelerin ve o malzemelere bağlı ısı tesiri altındaki bölgelerin sertlik değerleri hariç, diğer bölgelerdeki sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Buradan çıkarılacak yorum; zırh çeliklerinin östenitik yapıya kaynak dolgu metalleri ile ıslah ve yapı çelikleri kaynağında, sabit kaynak parametreleri ve aynı koruyucu gaz ortamında sertlik değerlerinin, kaynak dikişi bölgesi, zırh çeliği ana malzemesi ve bu malzemeye bağlı ısı tesiri altındaki bölgelerde hemen hemen eşit değerlerde olacağı yorumu yapılabilir. Zırh çeliğine kaynaklı diğer ana malzemelerin (SAE 4140, C45, S355J2) ısı tesiri altındaki bölgelerinin sertlik değerlerinin yüksekliğine göre sıralamasında; SAE 4140 çeliği kaynağındaki değerlerin ortalama 480 HV civarında ve en yüksek olduğu, C45 çeliği kaynağındaki değerlerin ortalama 250 HV civarında ve ikinci sırada olduğu, S355J2 çeliği kaynağındaki değerlerin ise ortalama 150 HV civarında ve sonuncu sırada olduğu değerlendirilir. Buradan çıkacak sonuçlarla birlikte, sadece SAE 4140 çeliği kaynağındaki bu çeliğe bağlı ısı tesiri altındaki bölgenin sertliklerinin, zırh çeliği tarafında ısı tesiri altındaki bölge sertliklerine eşdeğer olduğu; C45 çeliği kaynağındaki bu çeliğe bağlı ısı tesiri altındaki bölgenin sertliğinin, zırh çeliği ve SAE 4140 çeliği tarafındaki ısı tesiri altındaki bölge sertlik değerlerine göre yarı yarıya düşük olduğu söylenebilir. S355J2 çeliği kaynağında, ısı tesiri altındaki bölgenin sertliğinin ise beklendiği gibi, malzemenin ve dolgu metalinin karbon ve alaşım elementleri oranına bağlı olarak diğer çeliklerden daha düşük olduğu görülmüştür. Zırh çeliğine kaynaklı her üç farklı çeliklerin kaynak dikişi sertliklerinin her üç numunede de (T1, T2 ve T3), balistik özellik beklenen sert yapıdaki zırh çeliği malzemesi sertliğinden, yaklaşık olarak üçte bir oranından daha fazla düşük sertliğe sahip olduğu yorumu yapılabilir.

Tablo 8.7. Sertlik değerlerinin ortalamaları ile oluşturulmuş sonuçların tablo görünümü.

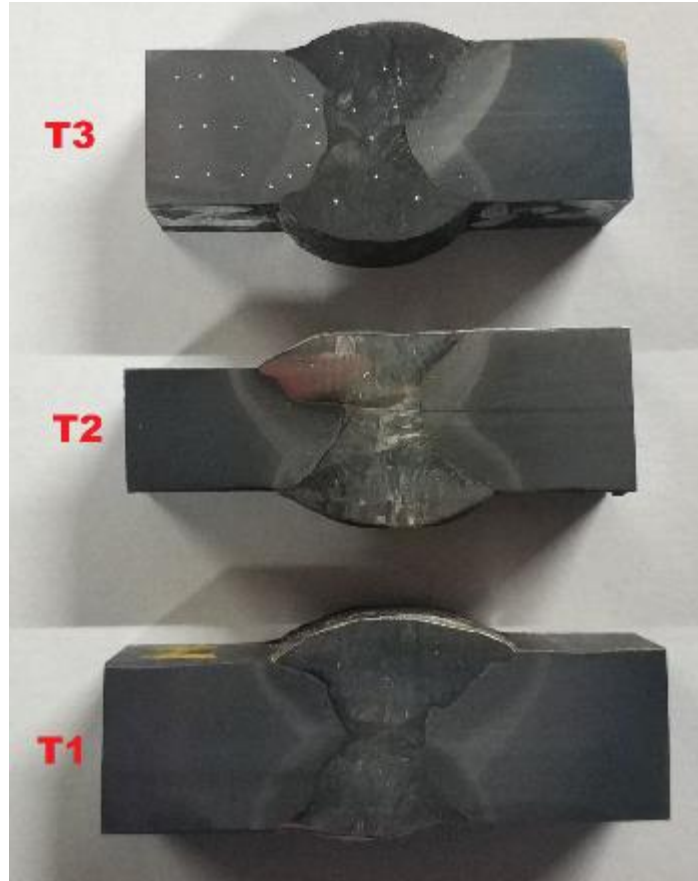
HV10	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T1	440	411	363	422	446	458	213	205	200	496	470	465	379	384	388
T2	467	452	434	398	449	468	219	215	222	240	252	249	263	272	278
T3	445	417	383	425	430	439	184	194	199	152	148	148	150	150	151



Şekil 8.27. Numunelerin sertlik dağılımları ortalamalarının bölgelere göre karşılaştırma grafiği.

8.2.5. Makro/mikro yapı testi sonuçları

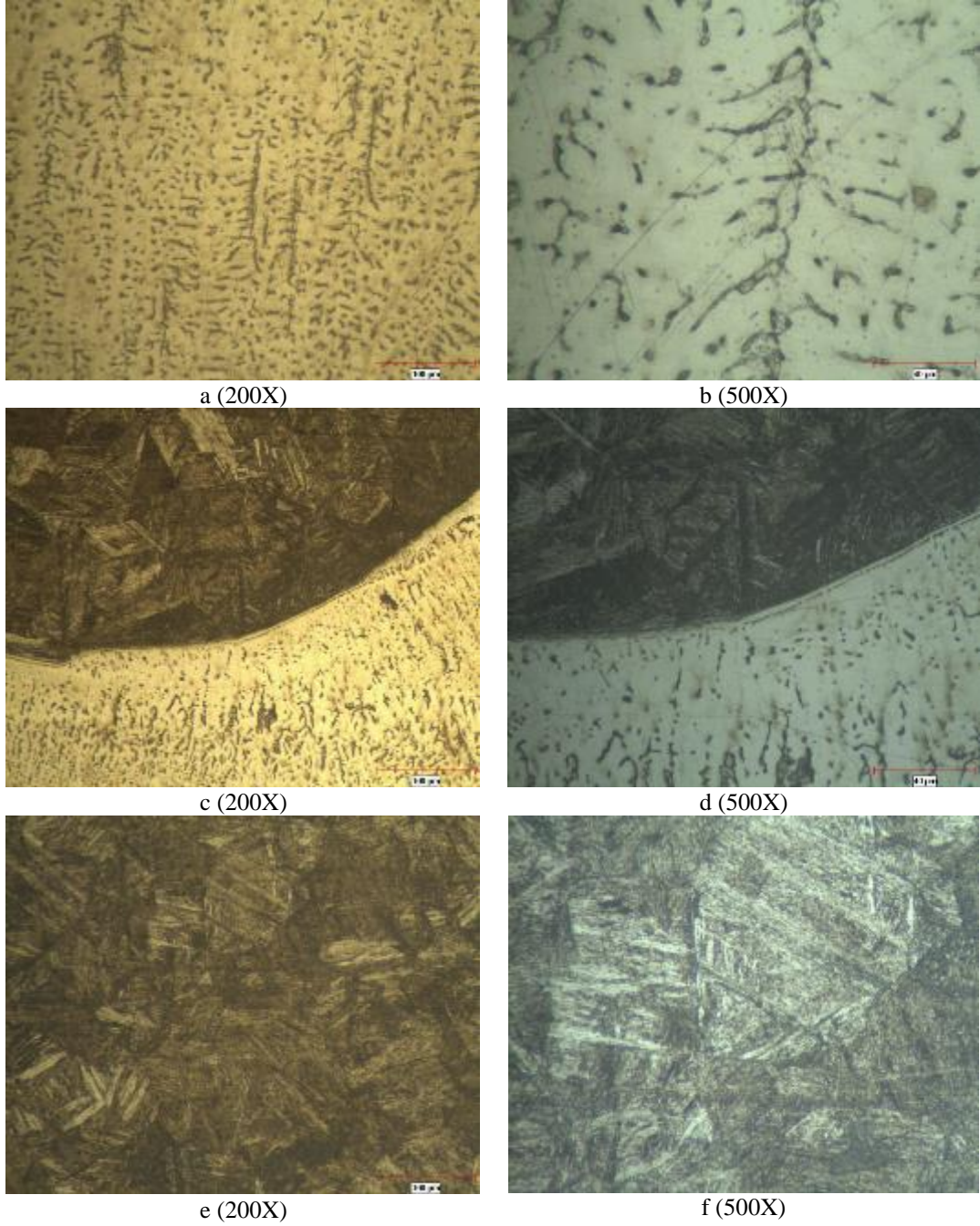
Makro/mikro yapı incelemesi için test numunelerinin yüzeyleri 240-360-600-800-1000-1200-2500 numaralı zımparalarla 3,5 dakika süreyle herbiri sırayla zımparalanmış, 6 μ ve 1 μ 'luk alümina solüsyonlarla çuha keçe ile 5'er dakika süreyle de parlatılmıştır. Parlatma sonrası numunelerin kaynak bölgesi Kalling's No:2 (5g CuCl₂, 100ml HCl, 100ml Etanol) dağlama ayracıyla, diğer bölgeler ise %3 Nital ayracı ile dağlanmıştır. Dağlama sonrası numunelerin makro görüntüleri Şekil 8.28.'de verilmiştir. Makro incelemelerde kaynak bölgesine ait kök paso, alt ve üst kapak pasoları ile birlikte, ana malzemelerde oluşan nüfuziyet ve kaynak dikişinden geçiş bölgeleri rahatlıkla seçilebilmektedir.



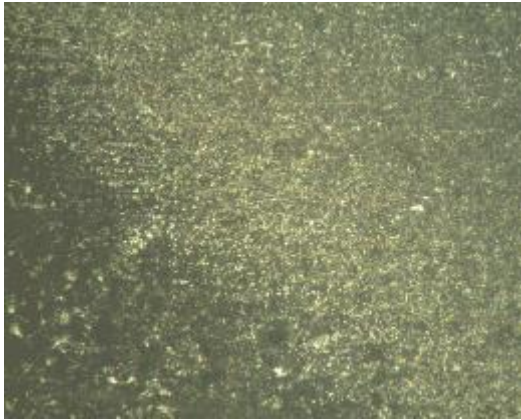
Şekil 8.28. T1, T2 ve T3 numunelerine ait makroyapı görüntüsü.

Östenitik yapıdaki dolgu metali ile yapılan kaynaklı birleştirme sonucu elde edilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde; kaynak dikişi bölgesinde, östenitik matriksin içerisinde dağılmış δ -ferrit yapılarının olduğu görülmüş ve bu yapılar yer yer dendritik katılaşma göstermiştir. Ergime hattında çizgi gibi belirgin bir şekilde kaba martenzit ve temperlenmiş martenzit ile beynit ve perlit-ferrit yapılarından östenitik matriksli kaynak metaline geçişler göze çarpmaktadır. Ergime çizgisi nüfuziyet bölgesinde T1 ve T2 numunelerinde yoğunluk olarak östenit fazı içerisinde az miktarda δ -ferrit yapıları görülüyor. Kaynak metaline doğru ilerledikçe daha fazla oranda dendritik δ -ferrit yapıları göze çarpmaktadır. T3 numunesinde ise ergime hattında östenitik matriksin içerisinde daha yoğun δ -ferrit yapıları vardır. Östenitik matriksli kaynak metali yapısı sertlik ölçümlerinde görüldüğü üzere düşük sertliğe sahiptir. Kaynak metalinden ısı tesiri altındaki bölgelere doğru ilerledikçe (ITAB), T1 numunesinde her iki ana malzemede de temperlenmiş martenzitler göze çarpmakta ve paralelde yer yer kaba martenzitler de görülmektedir. Temperlenmiş martenzit

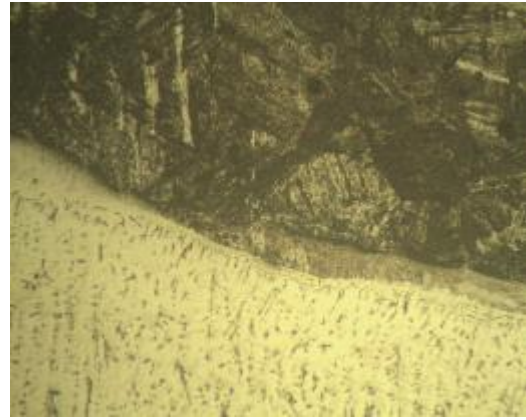
bölgelerinde kaba martenzit bölgelerine göre sertlik testinden de anlaşılacağı üzere nispeten daha düşük sertlik görülmüştür. T2 ve T3 numunelerinin zırh çeliği ITAB bölgelerinde T1 numunesinde olduğu gibi temperlenmiş ve soğuma hızına göre kaba martenzit bölgeleri görülmüştür. T2 numunesinde C45 çeliği ITAB bölgesinde, ıslah ısıtma işlemi ve sonrasında temperleme sonucu oluşan beynitik yapılar görülmüştür. ITAB bölgelerinde ana malzemelere doğru ilerledikçe mikroyapı fotoğraflarından görüleceği üzere tane yapıları farklılıkları ve faz dönüşümleri göze çarpmakta, bu da sertlik testindeki farklı sonuçlardan tespit edilmektedir. Bu farklılıkların sebebi, kaynak operasyonundaki sıcaklık nedeniyle oluşan soğuma hızları ile kaynak işlemi sırasında alt ve üst pasoların ıslah pasosu dediğimiz temperleme işlemi gibi davranmasından ötürü oluşması muhtemeldir. T3 numunesi S355J2 çeliği ITAB bölgesinde ise, ferrit ağırlıklı ferrit-perlit yapısı görünmekte, yine bu bölgede tane sınırları açığa çıkmakla birlikte ince taneli ve kaba taneli yapı oluşumları da göze çarpmaktadır. Yapılan benzer çalışmalarda kaynak metalinde östenitik matriksli ferrit yapıların ara paso uygulamalarının balistik performansa etkileri, çalışmalardaki mikroyapılarla benzer olduğu görülmüştür. Numunelerden alınan farklı büyütme ölçeklerindeki mikroyapı fotoğrafları Şekil 8.29., Şekil 8.30. ve Şekil 8.31.'de verilmiştir.



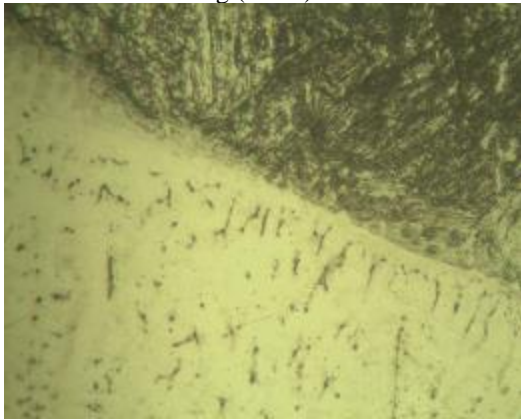
Şekil 8.29. T1 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) SAE 4140 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.



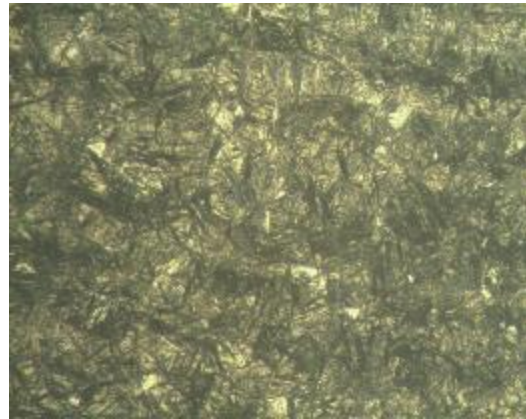
g (200X)



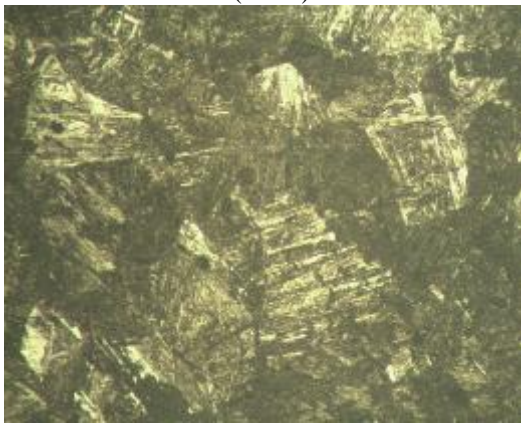
h (200X)



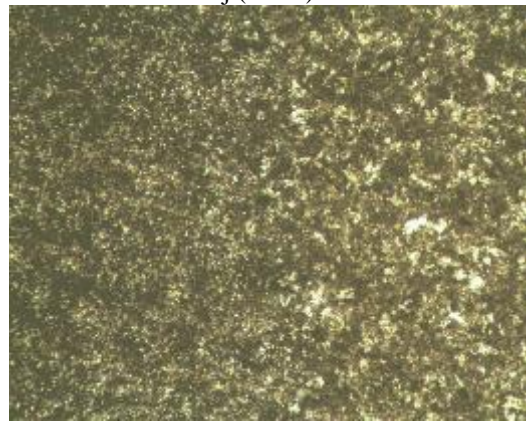
i (500X)



j (200X)

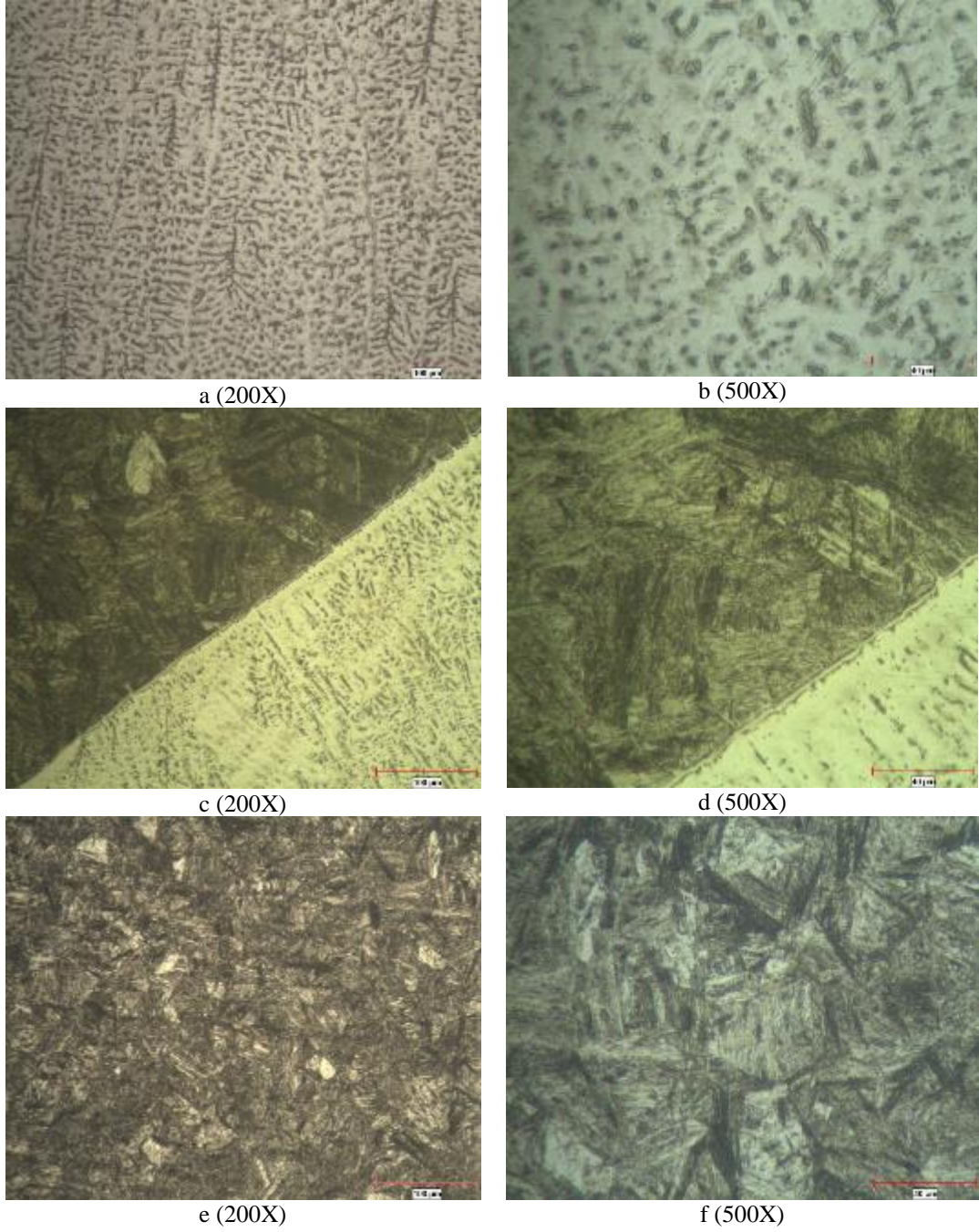


k (500X)

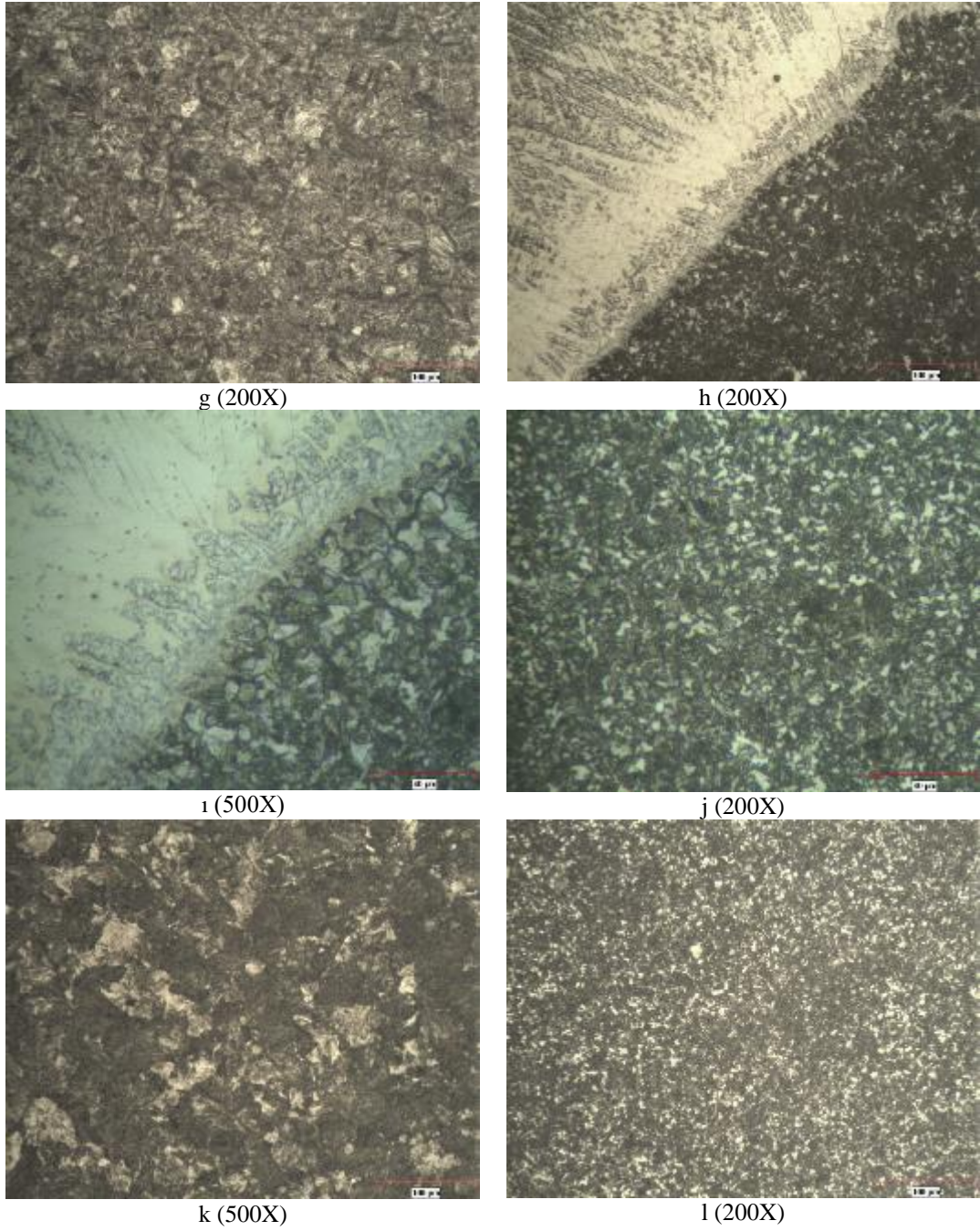


l (200X)

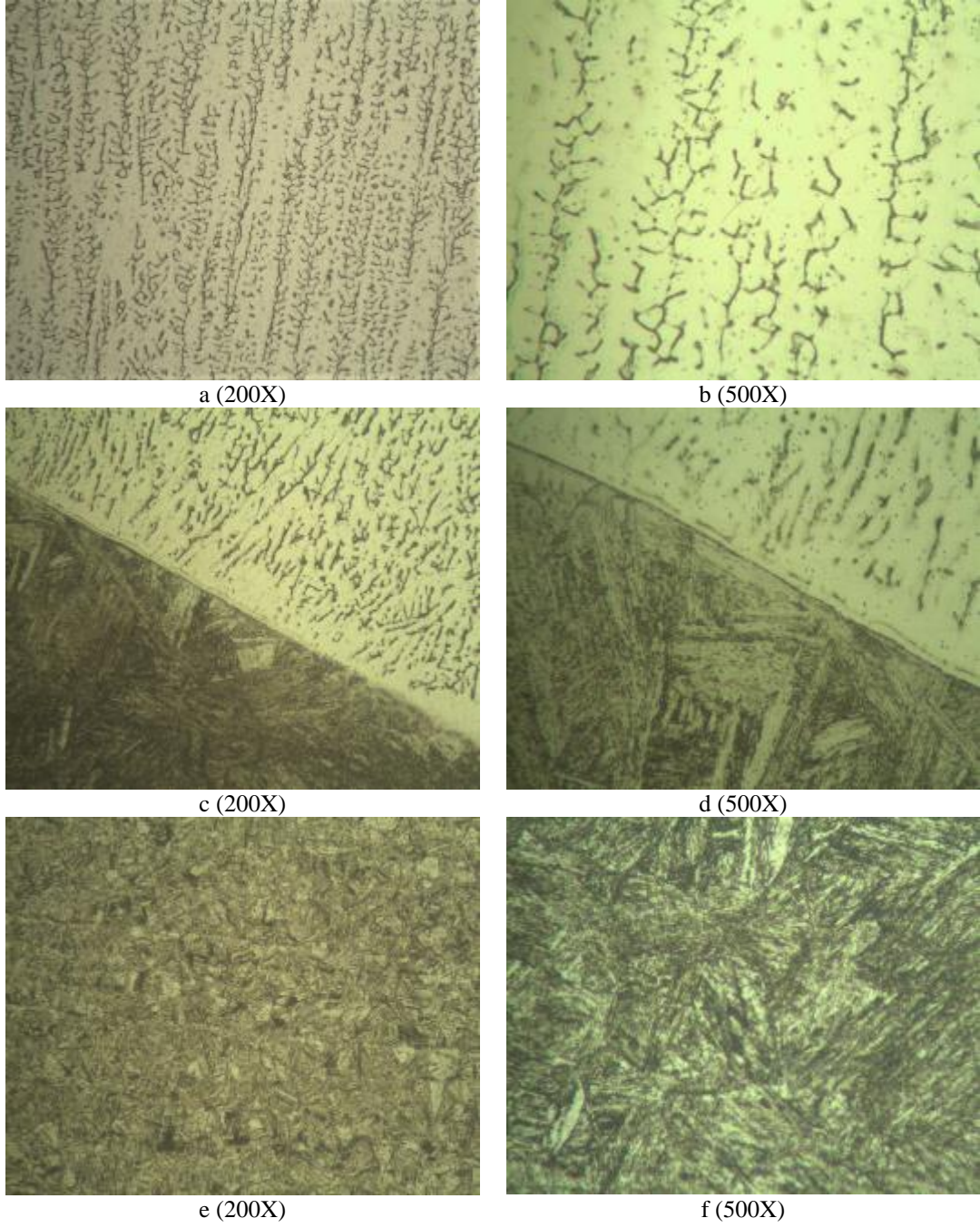
Şekil 8.29. (Devamı)



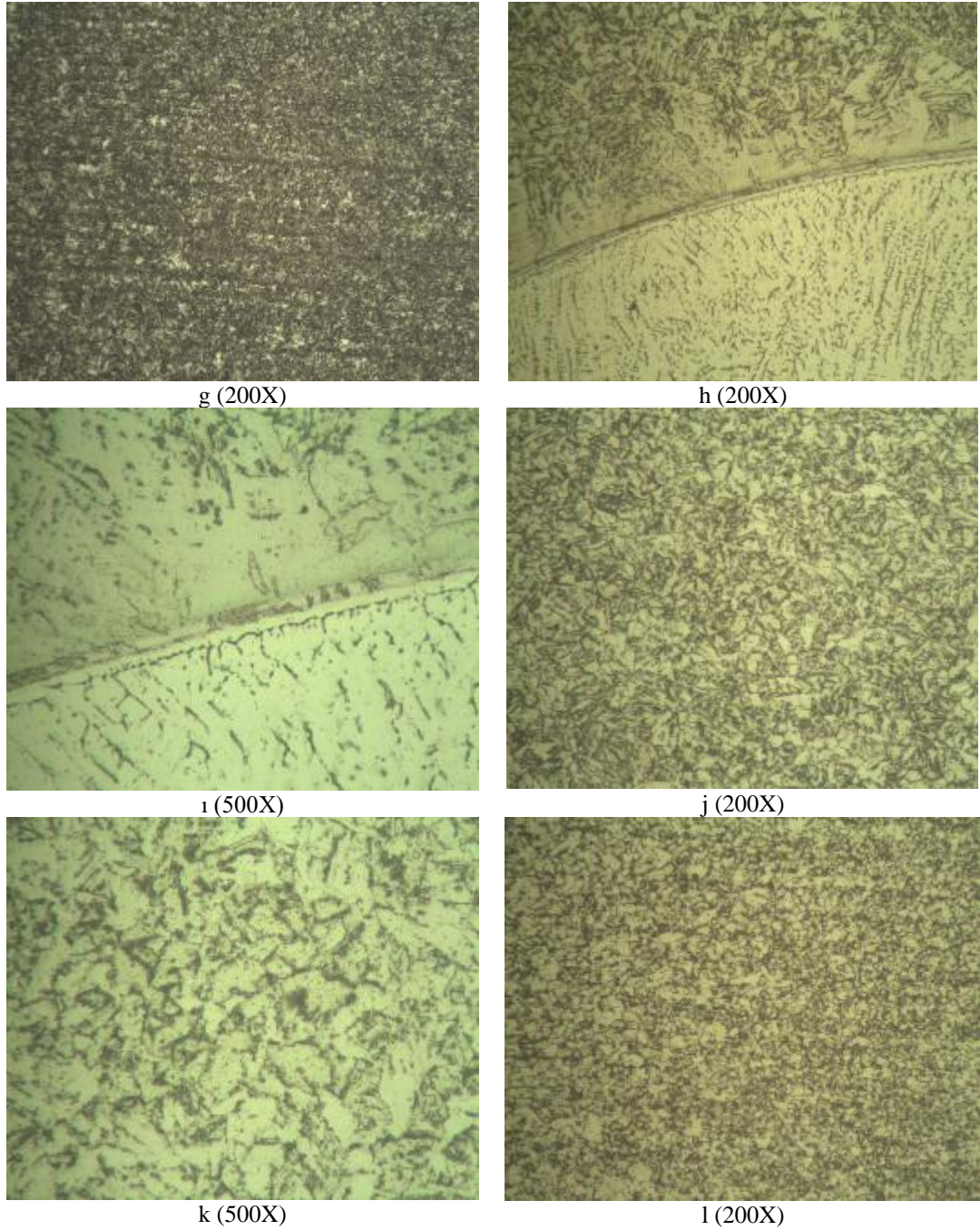
Şekil 8.30. T2 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, ı, j, k, l) C45 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.



Şekil 8.30. (Devamı)



Şekil 8.31. T3 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri mikroyapı görüntüleri; a, b) kaynak metalı bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, i, j, k, l) S355J2 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.

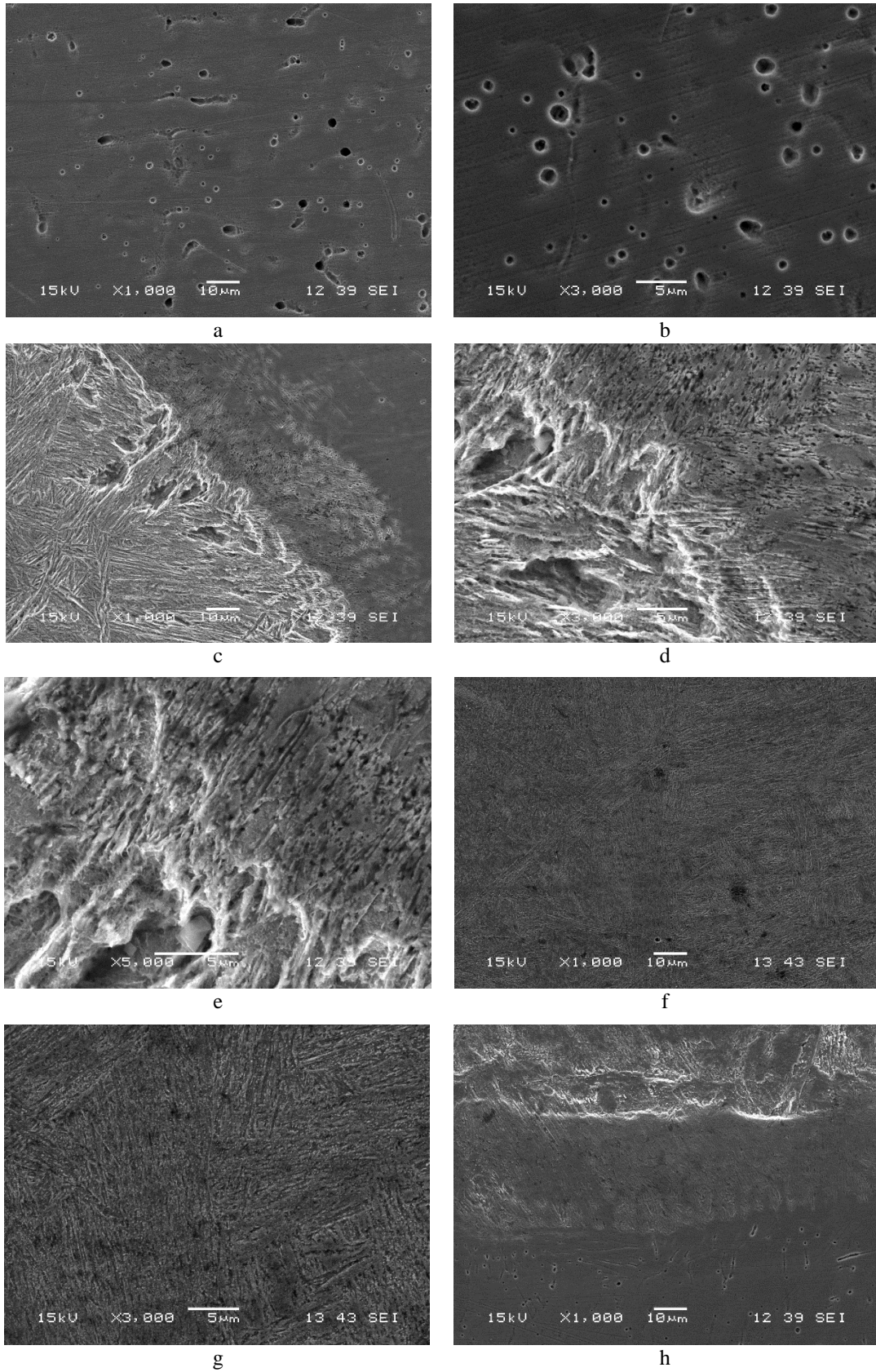


Şekil 8.31. (Devamı)

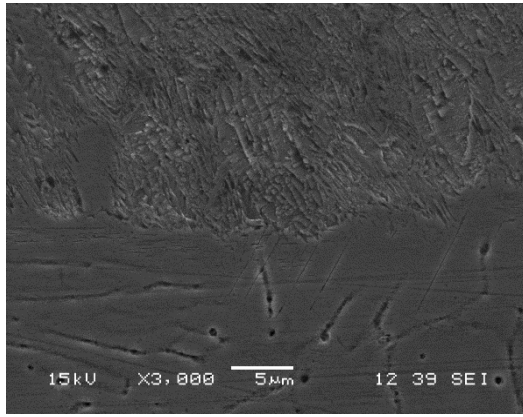
Makro ve mikroyapı analizi yapılan numunelere, morfolojik yapıyı desteklemek amacıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile detaylı olarak inceleme yapılmıştır.

SEM görüntülerinde tüm numunelerde kaynak metalinde asitle dağlanan bölgelerin δ -ferrit olduğu, düz görünüm olan yüzeylerin ise östenit fazı olduğu anlaşılmaktadır. Bazı bölgelerde δ -ferrit miktarı fazla iken, bazı bölgelerde ise daha az miktarda

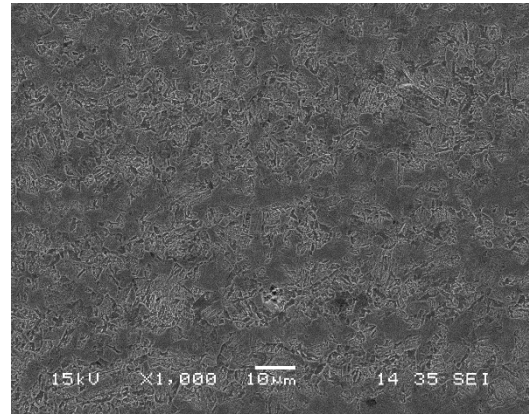
olduğunu görmekteyiz. Bu nedenle soğuma hızı ve katılaşmanın kaynak metali mikroyapısında oldukça etken olduğu söylenebilir. Bu etki kapak paso bölgesinde hızlı soğumadan dolayı δ -ferrit miktarında artışa neden olurken, yavaş soğuma bölgelerinde östenit fazının oluşumunu artırmıştır. Ara pasalarda da soğuma ve katılaşma hızından dolayı ferrit miktarında azalma görmekteyiz. ITAB geçiş bölgelerinde ana malzemelerdeki martenzitik yapının östenitik yapı ile keskin bir şekilde dönüştüğü özellikle Şekil 8.32’de 5000X büyütme olan ‘e’ fotoğrafında açıkça görülmektedir. Bu bölgelerde sementit fazı oluşumu da görülmüştür. Yapıdaki δ -ferrit östenit fazını sertleştirecektir, bu da bölgesel sertlik farklılıklarına neden olacaktır. Zırh çeliğine kaynaklı diğer ana malzemeler olan SAE 4140 ve C45 çeliğinin kaynak metalinden ITAB geçiş bölgelerinde ise temperlenmiş martenzit ile yer yer kaba martenzit yapıları görülmektedir. Özellikle C45 çeliğinin ITAB bölgesinde beynit fazının daha fazla görüldüğü, 3000X büyütmelerde ise alt beynit ve üst beynit yapıları ve onu takip eden trostit fazının oluştuğu görülmüştür. Yine bu bölgelerde ısı tesirinden dolayı tane boyutlarındaki farklılıkları ve faz geçişlerini de görmekteyiz. Kaynak pasoları nedeniyle sıcaklık ve soğuma farkından dolayı ITAB bölgelerinden ana malzemeye doğru ilerledikçe farklı fazlar oluştuğunu gözlemlemekteyiz. S355J2 çeliği ITAB bölgesinde ise yine östenit fazı ile ferrit-perlit yapısında keskin dönüşüm görülmekte, sıcaklık ve soğuma etkisiyle ITAB bölgesinde tane sınırları açığa çıkmış farklı tane boyutlarında ferrit ve ince perlit oluşumları göze çarpmaktadır. ITAB bölgelerindeki bu farklı yapıları fazlar sertlik ölçümlerinde farklı değerler görmemize neden olmuştur. Sonuç olarak; sertlik ölçümündeki değerlerle, mikroskop ve SEM incelemesindeki mikroyapıların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. İlgili SEM fotoğrafları Şekil 8.32., Şekil 8.33. ve Şekil 8.34.’te gösterilmiştir.



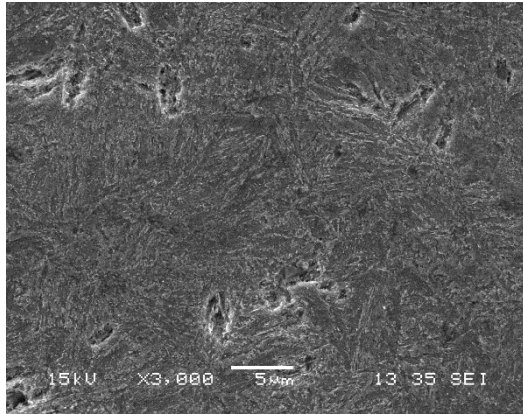
Şekil 8.32. T1 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, i, j, k, l) SAE 4140 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.



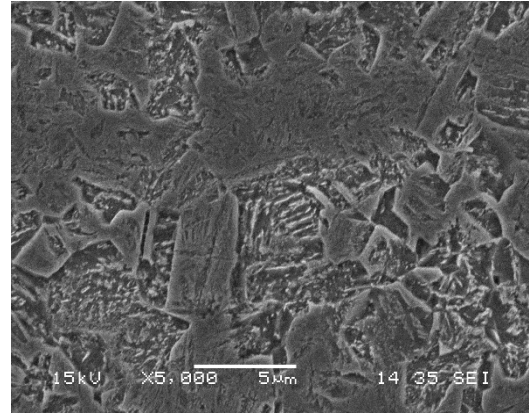
i



j

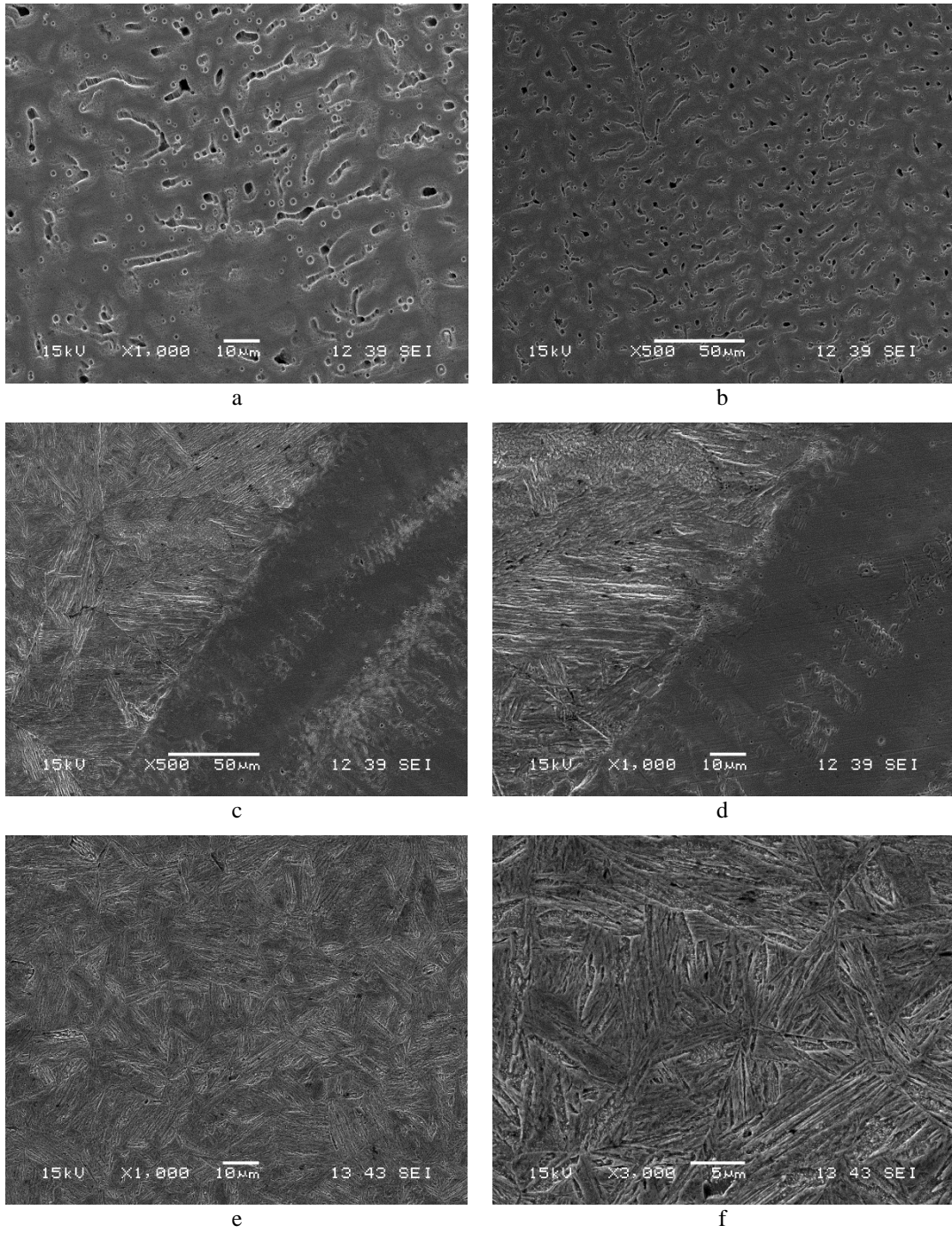


k

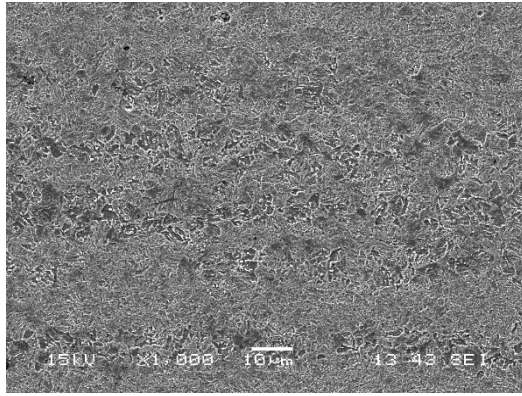


l

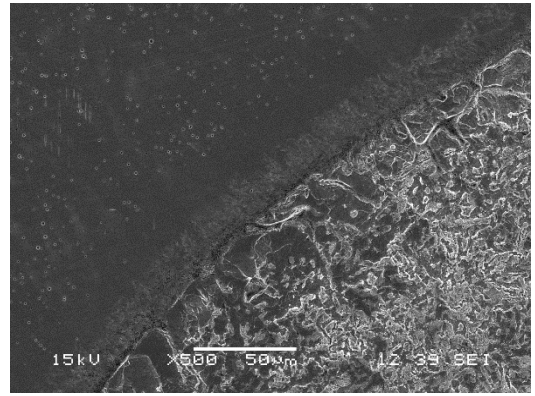
Şekil 8.32. (Devamı)



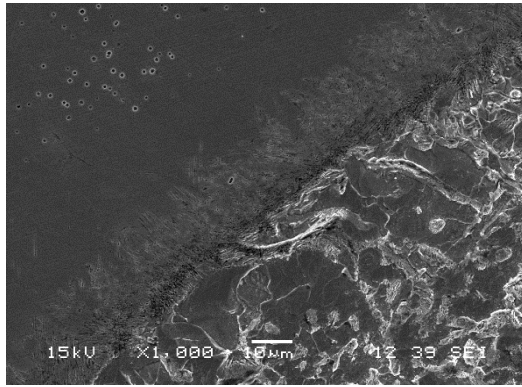
Şekil 8.33. T2 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f, g) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; h, i, j, k, l, m, n) C45 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.



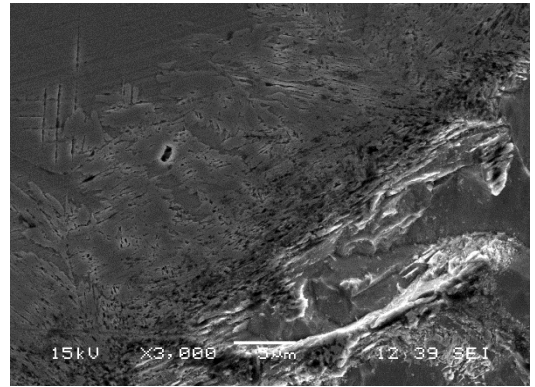
g



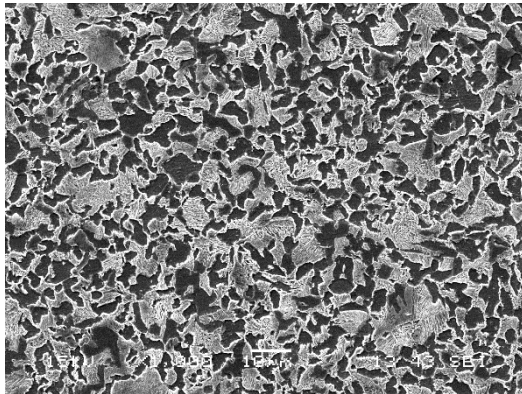
h



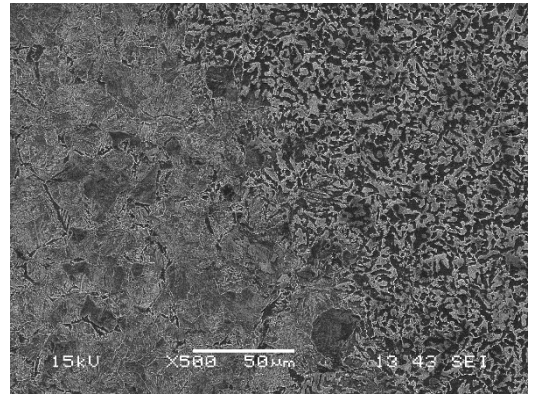
i



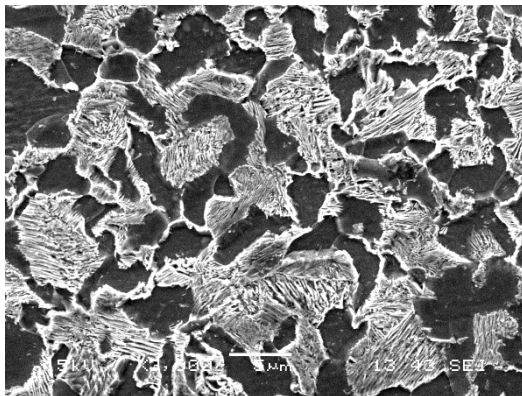
j



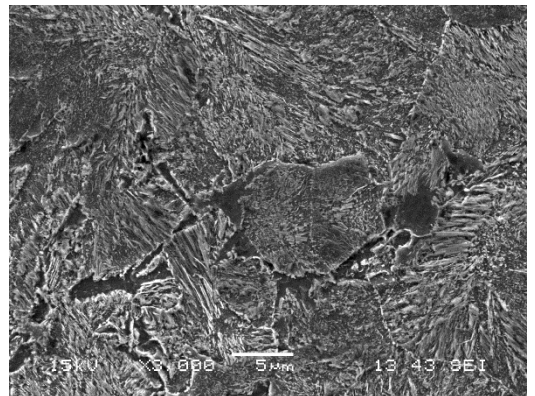
k



l

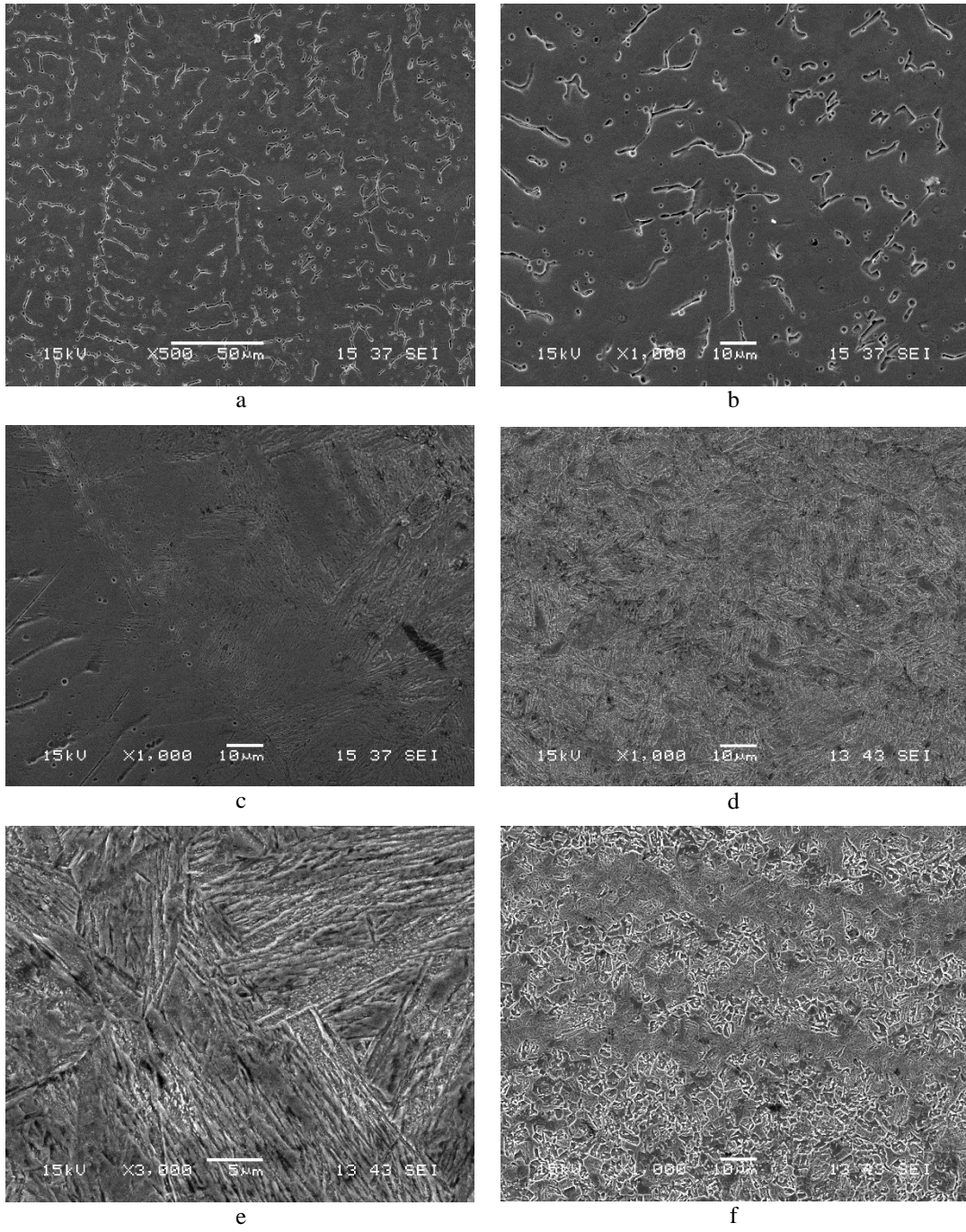


m

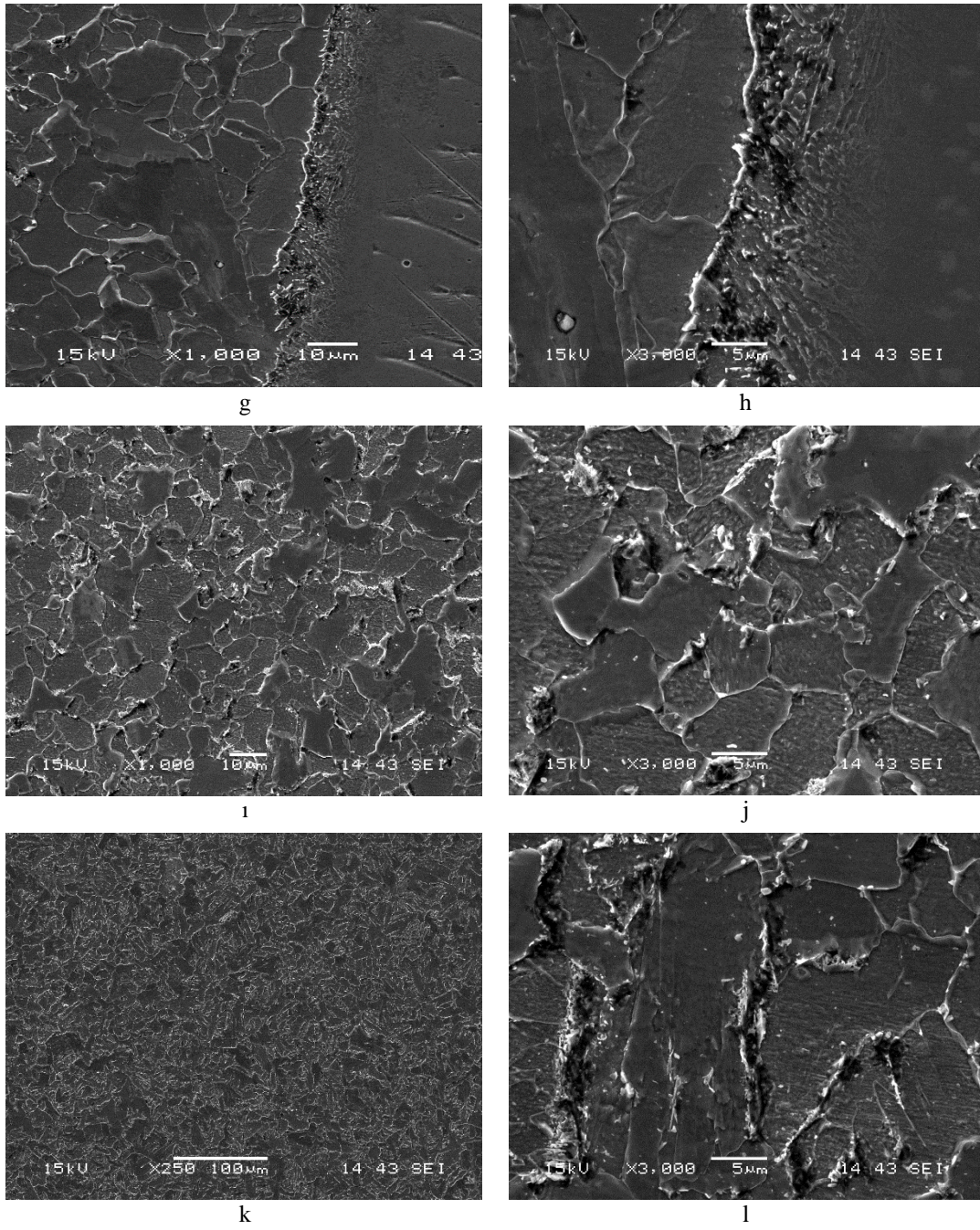


n

Şekil 8.33. (Devamı)



Şekil 8.34. T3 numunesine ait kaynak ve ITAB bölgeleri SEM görüntüleri; a, b) kaynak metali bölgesi; c, d, e, f) zırh çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri; g, h, i, j, k, l) S355J2 çeliği geçiş bölgesi ve ITAB bölgeleri.



Şekil 8.34. (Devamı)

BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yaptığımız çalışmada, Armox 500T zırh çeliğinin, ıslah ve yapı çelikleri ile kaynaklanabilme özellikleri araştırılmış, kaynaklı bölgelere ait birçok mekanik özellik ile birlikte mikroyapısal faz dönüşümleri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular ve nicel sonuçlar neticesinde benzer konularda çalışmalar yapacak araştırmacılar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

9.1. Sonuçlar

1. Östenitik dolgu malzemesi ile kaynaklı her bir test numunesine yapılan çekme testleri sonrası, Armox 500T zırh çeliği ile SAE 4140 ve C45 çeliği ana metallere göre daha zayıf mekanik özelliklere sahip kaynak metalinden kopmalar görülmüştür.
2. Armox 500T zırh çeliğine kaynaklı S355J2 yapı çeliğinin test numunesine yapılan çekme testi sonrası, beklenildiği üzere en düşük mekanik özelliklere sahip S355J2 yapı çeliğinden kopma olmuştur.
3. Zırh çeliğine östenitik dolgu metali ile birleştirilmiş SAE 4140 çeliğinin numunelerine (T1) yapılan çekme testinde elde edilen sonuçlarda, çekme ve akma mukavemetleri diğer kaynaklı T2 (Zırh çeliği-C45) ve T3 (Zırh çeliği-S355J2) test numunelerinden beklenildiği üzere daha yüksek çıkmıştır.
4. Zırh çeliği ve östenitik dolgu metali ile kaynaklı S355J2 numunelerindeki (T3) kaynak metalinin mekanik değerleri, ana metal S355J2 çeliğinden daha iyi özellikte olduğu tespit edilmiştir.
5. Çentik darbe testi sonuçlarında; kaynak metali bölgesinde en yüksek darbe direncine sahip test numunesi, zırh çeliği ile S355J2 yapı çeliği kaynaklı numunelerde (T3) görülmüştür.

6. Çentik darbe testi sonuçlarında; balistik özellik beklenen zırh çeliklerinin kaynaklı numunelerindeki ısı etkisi altındaki bölgelerde en iyi darbe dayanımı zırh çeliğine kaynaklı SAE 4140 ıslah çeliği numunelerinde (T1) olmuştur. Zırh çeliğine kaynaklı diğer ana metallerin ısı etkisi bölgelerinde balistik açıdan darbe dayanımı beklentisi yoktur.
7. Sertlik testlerinde her üç farklı test numunelerinde zırh çeliği ana malzemesi, zırh çeliği ısı etkisi altındaki bölgeler ile kaynak bölgelerinde benzer sertlik değerleri görülmüş; zırh çeliğine kaynaklı diğer ana malzemelerde sırasıyla SAE 4140, C45 ve S355J2 çeliklerinin sertlikleri grafikte birbirinden farklı değerlerde azalarak devam etmiştir. Bu da çeliklerin içerdikleri karbon ve alaşım elementleri oranlarına göre beklenen bir durumdur ve sertlik dağılımları kabul edilebilir düzeydedir.
8. Zırh çeliğine kaynaklı SAE 4140 çeliğinin, ısı etkisi altındaki bölge sertlik değerlerinin ana malzemelerin sertlik değerlerinin üzerinde olduğu görülmüş, bu artışın çeliğin içerdiği karbon ve karbür yapıcı alaşım elementleri oranlarına göre proses gereği kabul edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmiştir.
9. Balistik özellik açısından önem arz eden sertlik değerinin, kaynak metalinde zırh çeliğine göre istenen değer çok altında olması istenmeyen bir durum olup, kullanılacak mühendislik yapılarında ve zırhlı araçlarda ilave önlemler gerektiren bir bölge olduğu elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır.
10. Eğme testi sonuçlarında, SAE 4140 çeliği test numunelerinin (T1), C45 çeliği test numunelerine (T2) göre daha fazla kırılma açısına sahip olduğu görülmüş; S355J2 çeliği test numunelerinde (T3) ise kırılma görülmemiştir. S355J2 çeliğinin sünek karakteristikli olması sebebiyle test sırasında kaynaklı numunelerinin S355J2 çeliği bölgesinden 180° büküldüğü saptanmıştır.
11. Optik mikroskop ile makro ve mikroyapı incelemelerinde tüm test numunelerinde ergime hattı net bir biçimde makro olarak görülmüş; kaynak metalinde östenit fazı içerisinde δ -ferrit fazları ve dendritik katılaşmış delta ferrit yapıları incelenen mikroyapılarda görülmüştür. Zırh çeliği ITAB bölgelerinde kaba ve temperlenmiş martenzitin yanı sıra bazı bölgelerde beynitik yapı görülmüş, zırh çeliğine kaynaklı diğer çeliklerin ITAB bölgelerinde ise az miktarda kaba (iğnemesi) martenzit ile temperlenmiş

martenzit ve takiben beynit fazı ile S355J2 çeliğinin kimyasal kompozisyonu gereği farklı tane boyutlarında ferritik ve perlitik yapılar saptanmıştır.

12. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan mikroyapısal malzeme tayininde, martenzitik yapıdaki zırh çeliğinin östenitik yapılı kaynak dolgu metali ile birleştirilmesi sonucu çizgi halinde ince ergime hattı daha net biçimde görülmüş, geçişlerde iğnemi martenzitin östenit fazı ile ayrımı net bir biçimde ortaya çıkmıştır. Yine bu bölgelerde sementit fazı da tespit edilmiştir. Zırh çeliğine kaynaklı diğer ana metallerin ITAB geçişlerinde ergime çizgisi yine net bir biçimde görülmekte, yer yer iğnemi (kaba) martenzit ve temperlenmiş martenzit ile onu takip eden alt ve üst beynit ile trostit fazları; yapı çeliği bölgelerinde ise ferritik ve ince-kaba perlitik yapılar olduğu saptanmıştır.

9.2. Öneriler

1. Yapılan bu çalışma farklı zırh çelikleri ile denenebilir, aralarındaki mekanik ve balistik açıdan darbe dayanımı farkları incelenebilir.
2. Beklenen mekanik özelliklere göre ferritik, östenitik veya başka tür kaynak dolgu metalleri ile koruyucu gaz kompozisyonları değiştirilerek parametre optimizasyonları çalışılabilir.
3. Farklı kaynak parametreleri ile farklı zırh çelikleri ve kaynaklanabilen diğer çelik türlerinin kaynaklanabilme yetenekleri ve mekanik özellikleri karşılaştırılıp araştırılabilir.
4. Yapılan bu çalışmada kalıntı gerilmeler incelenerek, kalıntı gerilme giderme işlemi uygulanabilirliği ve balistik açıdan malzeme ömrü uzatma ve dayanımı artırma konusunda çalışılabilir.
5. Kaynaklı imalat yöntemleri değiştirilerek toz altı, TIG, elektrik ark kaynağı gibi yöntemler denenerek zırh çelikleri ile kaynak kabiliyetleri araştırılabilir.
6. Yapılan bu çalışmada EDS analizleri yapılarak kalıntıların türleri, yapıları ve boyutları incelenebilir, fazların kimyasal kompozisyonları ve oluşan mikroyapısal fazlarda element değerleri araştırılabilir.
7. Bu çalışma parametrelerinde, kaynak öncesi malzemelere ön tav veya kaynak dikişi ve ITAB bölgelerine kaynak sonrası gerilim giderme tavlama

uygulanarak mekanik özellikler ve balistik açıdan mikroyapı incelemeleri yapılabilir.

8. Bu çalışmaya uygun olarak savunma sanayisinde kullanılan araçlarda oluşabilecek yorulma ve darbe dayanımları için testler yapılarak, iyileştirme yapılması gereken malzemelerde kaynak parametreleri üzerinde çalışılarak, uygun malzeme, kaynak ve kaynak dolgusu için malzeme tayini araştırılabilir.
9. Bu çalışmadaki aynı çelikler ile aynı parametre ve koşullarda köşe kaynağındaki mekanik değerlere etkiler ile mikroyapılar incelenebilir.
10. Farklı kaynak ağzı yapısı ile farklı kaynak paso denemelerinin mekanik ve mikroyapısal özelliklere etkisi araştırılabilir.
11. Farklı kalınlıklarda farklı kimyasal kompozisyonlara sahip ana malzemeler ile farklı amper, voltaj ve ısı girdisi değerlerinde kaynaklı imalat yöntemleri denenerek mekanik ve darbe dayanımı etkileri incelenebilir.
12. Bu çalışma veya aynı çeliklerde farklı kaynak metali dolgusu ile birleştirilen yöntemler için tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik test yöntemiyle kapsamlı hata tespitleri yapıp, mekanik değerlere etkisi araştırılabilir.
13. Yazılım programlarıyla, askeri zırhlı taşıyıcılar üzerinde kritik bölgelerde sağlanması gereken mekanik dayanımlar gereğince, o bölgelerde kullanılan malzeme çeşitlerine göre uygun kaynak metodu ve kaynak dolgu metali araştırması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yumak N., Pekbey Y., Aslanta K., Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, 2014.
- [2] Örenler, A., Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2018.
- [3] Atapek, Ş. H., Bor Katkılı Bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalürjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi Ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
- [4] Yakut, V., Zırh Çeliklerinin Ferritik Ve Östenitik Dolgu Malzemeleriyle Kaynağının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2015.
- [5] Savunma Bilimleri Dergisi The Journal of Defense Sciences Kasım/November 2012, Cilt/Volume 11, Sayı/Issue 2, 159 171.
- [6] <https://www.magnoliabox.com/products/anatomical-cuirass-breast-plate-end-4th-century-bc-42-62222701>, Erişim Tarihi: 18.11.2020.
- [7] <https://www.gdls.com/equipment/strykers.html>, Erişim Tarihi: 18.11.2020.
- [8] <http://www.globalsecurity.org/military/library/report/1988/CJ2.html>, Erişim Tarihi: 18.11.2020
- [9] Fulford, M., Sim, D., Doig, A., Painter, J., In Defence of Rome: A Metallographic Investigation of Roman Ferrous Armour from Northern Britain, Journal of Archaeological Science, 32, 241–250, 2005.
- [10] <https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/P27.pdf>, Erişim Tarihi: 19.11.2020.
- [11] <https://islamansiklopedisi.org.tr/zirh#1-turk-devletlerinde>, Erişim Tarihi: 19.11.2020.
- [12] <https://islamansiklopedisi.org.tr/zirh#2-turk-devletlerinde>, Erişim Tarihi: 19.11.2020.
- [13] Bhadeshia, H. K. D. H., Bainite in Steels – Transformations, Microstructure and Properties, The University Press, Cambridge, UK, 2001.

- [14] Galzvez, F., Cendon, D., Garcia, N., Enfedaque, A., Sanchez G. V., Dynamic Fracture Toughness of a High Strength Armor Steel, *Engineering Failure Analysis*, 16, 2567–2575, 2009.
- [15] Jacobi, H., Batinmann, H. J., Gronsfeld, J., New Method of Determining the Macrocleaness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel, *Stahl Eisen*, 108 (20), 54-66, 1988.
- [16] Matsubara, H., Osuka, T., Kozasu, I., Tsukada, K., Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength, High Toughness Steel Plate by Controlled Rolling, *Transactions ISIJ*, 12, 435-443, 1972.
- [17] Karagöz, Ş., Atapek, Ş. H., Yılmaz, A., Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fraktografik Etüt, *Metal Dünyası*, 2008.
- [18] Gingell, A. D. B., Bhadeshia, H. K. D. H., Jones, D. G., Mawella, K. J. A., Carbide Precipitation in Some Secondary Hardened Steels, *J. Mater Sci.* 32, 4815- 4820, 1997.
- [19] Thomson, R. C., Characterization of Carbides in Steels Using Atom Probe Field-Ion Microscopy, *Materials Characterization*, 44 (1-2), 219-233, 2000.
- [20] Güner, E., 4140 Çeliğinin Mekanik Aşınma Özelliklerine Lazerle Yüzey Sertleştirme İşleminin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2019.
- [21] <https://artmetalurji.com/islah-celikleri.html> Erişim Tarihi: 01.12.2020.
- [22] <https://www.omurcelik.com/urunlerimiz/islah-celikleri/80> Erişim Tarihi: 01.12.2020.
- [23] <http://www.hascelik.com/teknik-katalog/files/hascel%C4%B1k%20katalog.pdf> Erişim Tarihi: 01.12.2020.
- [24] Ç-4140 Çeliğinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.
- [25] SAE/AISI 4140 Çeliğine Uygulanan Farklı Isıl İşlemlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, OnDokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2017.
- [26] AISI 4140 Çeliğinin Sıcak Dövme Karakteristiğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2016.
- [27] Çelik Malzemeler Kitabı, Murat Aydın, Aybitak, 2017.

- [28] <https://docplayer.biz.tr/68209117-Bolum-10-celiklere-uygulanan-isil-islemler.html> Erişim Tarihi: 22.12.2020.
- [29] <https://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/armox-500t?accordion=downloads> Erişim Tarihi: 07.02.2021
- [30] MIL-A-46100E, Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, U.S. Military Specification, 2008.
- [31] [https://www.ssab.com/search#q=specifications%20for%20Armox%20500T&sort=relevancy&f:category=\[document\]](https://www.ssab.com/search#q=specifications%20for%20Armox%20500T&sort=relevancy&f:category=[document]) Erişim Tarihi: 07.02.2021
- [32] <https://www.uslularhadde.com/islah-celikleri> Erişim Tarihi: 08.02.2021
- [33] https://www.askaynak.com.tr/contents/34/20141002155231_kaynak-teknolojisi.pdf Erişim Tarihi: 08.02.2021
- [34] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-are-quenched-and-tempered-qt-steels-readily-weldable> Erişim Tarihi: 08.02.2021
- [35] Welding Instructions for Weldox and Hardox steel plate, Svenskt Stal
- [36] <https://weldinganswers.com/how-to-weld-4140-steel/> Erişim Tarihi: 08.02.2021
- [37] <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/welding-heat-treatable-steels> Erişim Tarihi: 08.02.2021
- [38] Ç 1040 Çeliklerinde Isıl İşlem ve Kaynağın Mekanik Özelliklerine Olan Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2013.
- [39] ODTU, Kaynak Mühendisliği Ders Notları. Avrupa Kaynak Federasyonu, 2005.
- [40] P460-St52 Malzeme Çiftinin Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2017.
- [41] <https://docplayer.biz.tr/160006364-4-hafta-celigin-siniflandirilmesi-celik-euronorm-2074-standardina-gore-su-sekilde-siniflandirilir.html>, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders Notları, 2019.
- [42] Eryürek, B., Gazaltı Kaynağı, Eczacıbaşı Yayınları, İstanbul, 2003.
- [43] <https://www.magmaweld.com.tr/ark-kaynak-yontemleri/i/12> Erişim Tarihi: 09.02.2021
- [44] Tülbentçi, K., MIG-MAG Eriyen Elektrot ile Gazaltı Kaynağı, Gedik Holding A.Ş. Yayınları, İstanbul, 1990.

- [45] Anık, S., Vural, M., Gazaltı Ark Kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü Yayın No:3, 15-237 - İstanbul, (1997).
- [46] Su Altı Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Ve Tahribatsız Muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018.
- [47] https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_03_00_aca05.pdf Erişim Tarihi: 12.02.2021
- [48] <https://www.szutest.com.tr/tahribatsiz-muayeneler/> Erişim Tarihi: 12.02.2021
- [49] <http://www.ndtteknik.com/ndt-kutuphane/tahribatsiz-muayene-de-en-cok-kullanilan-yontemler-nelerdir-53.html> Erişim Tarihi: 15.02.2021
- [50] <https://www.bergeng.com/blog/ultrasonic-testing-experts-discuss-nondestructive-testing/> Erişim Tarihi: 15.02.2021
- [51] <https://www.ndt.net/article/turkey2008/papers/29-ndt-14.pdf> Erişim Tarihi: 15.02.2021
- [52] http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tahribatli%20Muayene.pdf Erişim Tarihi: 19.02.2021
- [53] <http://ultrammat.com.tr/hizmetler-liste/tahribatli-testler/> Erişim Tarihi: 19.02.2021
- [54] Kubat, C., Kiraz, A., Yapay Zeka Kullanılarak Sanal Laboratuvar Tasarımında Çekme Testinin Modellenmesi, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 2012.
- [55] Akay, A., A., Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmesi Ve Birleştirmelerin Tahribatlı Ve Tahribatsız Muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012.
- [56] http://makine.gumushane.edu.tr/media/uploads/makine/files/a_centik-darbe-deneyi_foyu.pdf Erişim Tarihi: 20.02.2021.
- [57] Pehlivan, A., K., Düşük Alaşımli Yüksek Mukavemetli Çelikler İçin Kullanılan Kaynak Sarf Malzemelerinde Eksi Sıcaklıklarda Çentik Darbe Dayanımının Arttırılması Ve CTOD Değerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [58] Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Üç Nokta Eğme Testi Deney Föyü, 2017.
- [59] [https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu\(1\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu(1).pdf), Erişim Tarihi: 20.02.2021.

- [60] Ekinci, C., Düşük Karbonlu Mikro Alaşımli Çeliklerin Sertlik Ve Mikro Yapıları Üzerine Soğuma Hızının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011.
- [61] <https://www.emcotest.com/de/produkte-services/haertepreuefmaschinen/duravision-g5-halbautomat/>, Erişim Tarihi: 06.03.2021.
- [62] <https://www.troy-met.com/Content/urun-pdf/pdf-cfde7784.pdf>, Erişim Tarihi: 06.03.2021
- [63] http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sertlik%20%C3%961%C3%A7me%20Y%C3%B6ntemleri.pdf, Erişim Tarihi: 06.03.2021.
- [64] [https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab%20F%C3%B6yler/T%C3%BCrk%C3%A7e/D-Sertlik%20Deneyi%20\(2019-2020\).pdf](https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab%20F%C3%B6yler/T%C3%BCrk%C3%A7e/D-Sertlik%20Deneyi%20(2019-2020).pdf), Erişim Tarihi: 06.03.2021.
- [65] Akman, A., B., Raylı Sistem Araçları İmalatında Kullanılan 6061 ve 5083 Alaşımlarının TIG ve MIG Kaynaklarının Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleriyle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2018.
- [66] <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=ACD3681501884BA2B09D742FE19A0F7F&language=tr-TR>, Erişim Tarihi: 26.04.2021.
- [67] <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/app/uploads/sites/18/2019/03/B%C3%B6hler-Welding-Produktkatalog-EN-2019-1.pdf>, Erişim Tarihi: 26.04.2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ozan GARİP

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2012
Lise	Ordu Atatürk Lisesi	2007

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	OTOKAR Otomotiv ve Savunma San. A.Ş.	G. Kalite Uzm.Müh
2014-2017	DÖVSAN Dövme Çelik Metal San.	Kalite Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. ICAR Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi / 23,24,25 Ağustos / 2021

HOBİLER

Kitap okumak